



Universidade do Minho

Projeto de um seguidor para coberturas, destinado a painéis solares

(Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica)

Por

LEANDRO ANDRADE ARAÚJO, (nº50852)

Realizado em: Laboratório de Ensaio de Materiais, Universidade do Minho
Instalações da Metalgalva

Orientador: Professor Doutor António Costa Marques Pinho

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade do Minho
Guimarães, Dezembro de 2012

DECLARAÇÃO

Nome: LEANDRO ANDRADE ARAÚJO

Endereço electrónico: a50852@alunos.uminho.pt

Telefone: +351916798015

Número do Bilhete de Identidade: 13367948

Título da Tese de Mestrado: Projeto de um seguidor para coberturas,
destinado a painéis solares

Orientador: António Costa Marques Pinho

Ano de conclusão: 2012

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA
TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE
DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE
COMPROMETE;

Universidade do Minho, 18/12/2012

Assinatura:

Agradecimentos

Ao Professor Doutor António Costa Marques Pinho, um sincero agradecimento por acreditar e confiar, pela liberdade que me proporcionou, para desenvolver o projecto, pelas sugestões e ideias. O meu muito obrigado

À Metalogalva pela oportunidade e confiança dadas para a realização deste projecto, a utilização das suas instalações, equipamentos e documentação os meus agradecimentos.

Ao Engenheiro Helder Costa, Engenheira Sara Pimenta, Engenheiro Rui Cunha, Engenheiro Jorge Cordeiro e ao Cláudio agradeço pela partilha de conhecimentos, pela ajuda disponibilizada, deixo o meu obrigado.

Por fim, agradeço de forma muito especial aos meus pais, ao meu irmão e aos meus amigos pelo apoio, incentivo, paciência e compreensão.

Resumo

À medida que os combustíveis fósseis, como o petróleo, se tornam mais escassos e mais caros, o ser humano terá de optar por recursos energéticos alternativos e renováveis, como a água, o vento, as ondas do mar, a energia solar, recursos estes inesgotáveis.

A energia solar tem imenso potencial, devendo ser aproveitada para a produção de energia elétrica, uma vez que não emite gases de estufa para atmosfera e está presente em todo o globo terrestre. Devido a esses fatores, torna-se importante a produção de equipamentos que permitam tirar o máximo rendimento desta fonte energética.

Os seguidores solares para coberturas são uma solução pouco explorada no mercado. Esta estrutura irá permitir o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos, uma vez que fará o seguimento do sol, ao contrário das estruturas fixas, normalmente instaladas em coberturas

Abstract

As fossil fuels such as oil, become more expensive and more scarce, humans will have to opt for alternative and renewable energy resources such as water, wind, waves, solar energy, resources these inexhaustible.

Solar energy has huge potential and should be advantage for the production of electrical energy, since it does not emit CO₂ into the atmosphere and is present across the globe. Due to these factors, it is important to the production of equipment designed to derive the maximum performance of this energy source.

The solar trackers for roofs are a market unexplored solution. This structure will allow increased efficiency of photovoltaic panels, since they will be tracking the sun, instead of fixed structures, typically installed on roofs

Índice

DECLARAÇÃO.....	iii
Agradecimentos	iv
Resumo.....	v
Abstract	vi
Índice de figuras	ix
Capítulo 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	1
1.3 Apresentação da empresa	2
1.4 Motivação.....	2
1.5 Estrutura da tese	3
Capítulo 2	4
2.1 Energias renováveis.....	4
2.1 Energia Solar.....	6
2.2 Radiação solar	8
2.3 Energia Solar Fotovoltaica.....	10
2.3.1 Módulos solares fotovoltaicos	10
2.3.2 Tipos de células	12
2.4 Energia Solar Térmica.....	14
2.5 Seguidores solares.....	16
2.5.1 Tipo de seguidores solares	16
2.6 Microgeração	19
2.7 Mercado energético [5].....	21
2.9 Análise de mercado.....	24
Capítulo 3	28
3 Projeto estrutural	28
3.1 Especificações técnicas	28
3.2 Eurocódigos.....	30
3.2.1 Carga do vento	30
3.2.2 Carga da neve	35
3.3 Dimensionamento.....	37
3.4 Cálculo de ligações	46

3.4.1	Ligações com cavilhas.....	46
3.4.2	Elementos ligados por cavilhas	48
3.4.3	Ligações aparafusadas.....	49
3.5	Dimensionamento pelo método de elementos finitos	53
3.6	Seleção de componentes.....	55
Capítulo 4	58
4.1	Projeto para o fabrico	58
4.2	Descrição do produto	58
4.3	Modelação 3D	58
4.4	Desenhos técnicos	60
4.5	Processo de fabrico	61
4.5.1	Listagem de material	61
4.5.2	Sequência de fabrico e equipamentos	63
4.6	Plano de montagem	63
4.7	Plano de manutenção	65
Capítulo 5	67
5.1	Análise crítica e conclusões.....	67
Bibliografia	69
Anexos	71

Índice de figuras

Figura 1 - variação do preço por galão de petróleo [2].....	4
Figura 2 - consumo diário de barris de petróleo [4].	5
Figura 3 – metas para 2020, renováveis instaladas [5].	6
Figura 4 - crescimento das energias renováveis na Europa [5].....	7
Figura 5 - vagas de desenvolvimento da política de renováveis em Portugal [6].	7
Figura 6 - movimento de rotação e translação da Terra [7].....	8
Figura 7- componentes da radiação [8].....	9
Figura 8 – radiação solar na superfície terrestre [9].	9
Figura 9 – constituição de um módulo fotovoltaico [11].....	11
Figura 10 – descrição do funcionamento de uma célula fotovoltaica [13].	12
Figura 11 - corrente produzida com a variação do ângulo de incidência [14]. .	13
Figura 12 - principais produtores de células fotovoltaicas [15].	14
Figura 13 – funcionamento de um sistema solar térmico [17].	15
Figura 14 - central solar Gemasolar em Espanha [19].	15
Figura 15 – seguimento do sol através de um seguidor solar [20].	16
Figura 16 - seguidor solar de dois eixos [21].....	17
Figura 17 - variação do percurso do sol durante o dia nas estações do ano [21].	17
Figura 18 - seguidor solar de um eixo horizontal [21].	18
Figura 19 - seguidor solar de um eixo polar [21].	18
Figura 20 - rendimento das diferentes estruturas solares [23].	19
Figura 21 - sistema para produção de energia.....	20
Figura 22 – energia solar fotovoltaica instalada a nível mundial [5].	22
Figura 23 – 10 maiores produtores de energia fotovoltaica [5].....	22
Figura 24 – seguidor solar para coberturas comercializado pela <i>Sendekia</i>	24
Figura 25 - seguidor solar da <i>Texnometaliki</i>	25
Figura 26 – sistemas mecânicos do seguidor solar da <i>Texnometaliki</i>	26
Figura 27 - seguidor solar da empresa <i>Soportes Solares</i>	26
Figura 28 – dimensões de um painel solar.....	29
Figura 29 – sombra resultante da incidência dos raios solares na estrutura....	29
Figura 30 – comportamento do vento sobre os painéis.....	31

Figura 31 – sem obstáculos $\varphi = 0$.	34
Figura 32 – seguidor solar sujeito à carga da neve.	35
Figura 33 – divisão do território nacional para determinação de coeficiente de carga de neve.	36
Figura 34 - ambiente gráfico do <i>software Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012</i> .	37
Figura 35 – definição do grau de liberdade de cada barra.	38
Figura 36 – suportes móveis e fixos da estrutura.	38
Figura 37 – seleção do comportamento das barras.	39
Figura 38 – definição dos travamentos para o fenómeno de encurcadura.	39
Figura 39 – localização do centro de força para coberturas isoladas de uma vertente.	40
Figura 40 – ações aplicadas no seguidor.	41
Figura 41 – descarregamento das cargas sobre as longarinas.	41
Figura 42 – resultado obtidos após a última simulação.	42
Figura 43 – seguidor solar dimensionado pelo <i>software</i> .	43
Figura 44 – cálculo de cavilhas com recurso a folhas de cálculo.	48
Figura 45 – geometria do elemento de ligação à cavilha.	49
Figura 46 – distâncias requeridas na chapa de ligação.	52
Figura 47 – cálculo da resistência ao esmagamento do parafuso.	53
Figura 48 – resultado da simulação de uma chapa de ligação com orelhas.	54
Figura 49 - resultado da simulação de um componente para não permitir o levantamento da estrutura.	54
Figura 50 - resultado da simulação do braço de transmissão de movimento.	55
Figura 51 – seguidor solar.	59
Figura 52 – modelação 3d completa do seguidor solar.	59
Figura 53 - fins de curso.	59
Figura 54 – Conjunto de guiamento da estrutura.	60
Figura 55 – colocação do carril nos blocos de betão.	64
Figura 56 – colocação da base rectangular sobre o carril.	64
Figura 57 – colocação de pilares e tubos de atravancamento.	64
Figura 58 – ligação das longarinas.	65

Capítulo 1

1.1 Introdução

O sector energético das energias renováveis está em fase de expansão e apresenta-se como uma oportunidade de negócio para as empresas. Perante esta conjuntura, o desenvolvimento de novos produtos utilizando novas fontes de energia torna-se uma prioridade, para que as empresas possam aumentar o seu portefólio e cimentar as suas posições no mercado.

Para existir um crescimento sustentado através de energias renováveis, é importante o desenvolvimento deste tipo de produtos. A transição existente para as energias renováveis deve-se ao contínuo aumento do preço dos combustíveis fósseis mas sobretudo para diminuir as emissões de dióxido de carbono para atmosfera. Além de serem produtos que visam o aumento de produção de energia através de energia limpa e renovável.

A energia solar está a ganhar notoriedade rapidamente como um importante meio de expansão de recursos energéticos renováveis. Em Portugal, aposta-se cada vez mais neste tipo de energia. Contribuindo para esse facto, está atribuição de subsídios por parte do Estado para quem adquire soluções solares, e também, a recente criação do Instituto Português de Energia Solar, organismo que pretende contribuir para a projecção e o desenvolvimento deste sector no país. No sentido de aumentar a eficiência dos sistemas de painéis fotovoltaicos é desejável maximizar a sua capacidade de produção de energia.

1.2 Objetivos do trabalho

Na elaboração desta dissertação, estabelece-se como principais objectivos:

- Perceber a importância da utilização de energias renováveis;

- Analisar o potencial da energia solar;
- A existência de produtos similares no mercado;
- O dimensionamento da estrutura;
- Os processos utilizados para o fabrico do produto.

1.3 Apresentação da empresa

A Metalgalva - Irmãos Silvas, S.A foi fundada em 1971. Esta empresa é constituída por três unidades industriais que ocupam uma área total de 44000m², tendo ao serviço mais de 400 colaboradores e sendo a maior empresa do Grupo Metalcon.

A Metalgalva tem como principal atividade o projeto e fabrico de estruturas metálicas, tendo capacidade para efetuar ensaio de protótipos. Os produtos desenvolvidos têm aplicação em vários domínios de atividade, nomeadamente, energia, telecomunicações, vias rodoviárias e ferroviárias. Além dos produtos presentes em catálogo, a empresa disponibiliza um conjunto de serviços aos seus clientes, designadamente, corte de chapa, quinagem, soldadura e galvanização por imersão a quente [1].

1.4 Motivação

Este projeto é motivador pois visa complementar os conhecimentos teóricos adquiridos durante a formação com a prática, num departamento de projecto. O facto de partir para este trabalho, vindo de uma área diferente da exigida, ou seja, sem ligação à especialização de estruturas, tornará este um desafio ainda mais aliciante e motivador.

O desenvolvimento deste projeto nas instalações da empresa, dia após dia é uma excelente experiência para que a integração no mercado de trabalho seja uma realidade antecipada. O contato com profissionais experientes num ambiente industrial, certamente que foi uma mais-valia.

1.5 Estrutura da tese

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

No capítulo introdutório faz-se o enquadramento do tema, são apresentados os objetivos gerais e é expressa a motivação para a realização deste projeto.

No segundo capítulo apresenta-se a importância da aposta em fontes energéticas renováveis, concretamente a energia solar. Assim como abordar-se-á, o desenvolvimento do mercado solar para além de uma análise dos equipamentos semelhantes já existentes.

No capítulo 3 reporta-se a metodologia utilizada para a realização do projecto e dimensionamento do seguidor solar.

A descrição do produto, assim como todo o planeamento para a sua produção, serão abordadas no quarto capítulo.

Por fim, no último capítulo, abordar-se-ão as conclusões deste projecto, como uma análise do todo o trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2.1 Energias renováveis

Nos últimos anos, tem existido uma crescente aposta nas energias renováveis. Isto deve-se principalmente, ao aumento do preço do barril de petróleo (ver figura 1), à atual instabilidade dos países produtores de petróleo e a uma maior sensibilidade social e política em termos ambientais.

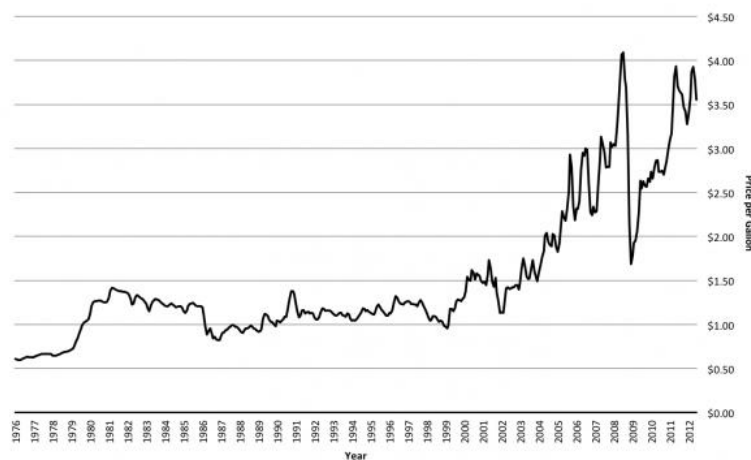


Figura 1 - variação do preço por galão de petróleo [2].

A formação das reservas de combustíveis fósseis durou milhões de anos e a manterem-se as tendências de crescimento do seu consumo, devido ao crescimento de países como a China e a Índia, e consequentemente as suas necessidades energéticas. Continuando com este ritmo, as reservas serão consumidas dentro de algumas décadas.

Aliado ao maior consumo de petróleo, cerca de 88,6 milhões de barris diários de petróleo (ver figura 2) segundo a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), está a escassez desta fonte de energia. Devido à sua escassez é necessário um maior investimento em novos meios e tecnologias para conseguir a sua extração [3].

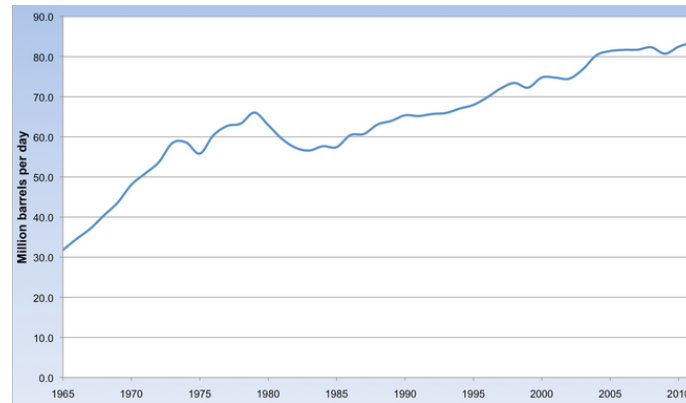


Figura 2 - consumo diário de barris de petróleo [4].

Contudo, não é apenas economicamente que os recursos combustíveis fósseis tornam-se cada vez mais, uma fonte de energia com diversos aspectos negativos. Em termos ambientais, tem existido uma grande luta contra as emissões de dióxido de carbono para atmosfera, como é exemplo o Protocolo de Quioto, o que revela a importância do uso de fontes energéticas sem emissão de gases com o efeito de estufa.

A Comissão Europeia estipulou para 2020, que 20% da energia produzida pelos estados membros seja exclusivamente através de energias renováveis. A figura 5 diz respeito à produção de energia utilizando exclusivamente fontes renováveis. As barras estão divididas em 3 partes. A primeira parte da barra (parte cinzenta) representa a capacidade de produção até 2005, enquanto a segunda parte (parte laranja) mostra a evolução que existiu de 2005 a 2010. A última parte evidencia as metas propostas para 2020, por cada um dos estados membros. Da figura 5, observa-se que apenas 10 dos 27 estados membros produz mais de 20% da sua energia através de fontes renováveis, com a Suécia a ser o país que mais energia produz (47%). Nos restantes 17 países, essa produção é inferior a 15%. Atualmente, a média Europeia é de cerca de 12,5%, sendo que Portugal situa-se acima desse valor, produzindo cerca de 25% da sua energia por meio das renováveis.

Estas exigências surgem com a missão de reduzir a dependência do ser humano dos combustíveis fósseis sendo esta, uma tendência inevitável. As

energias renováveis vêm contrastar com o cenário dos combustíveis fósseis, uma vez que são uma fonte praticamente inesgotável.

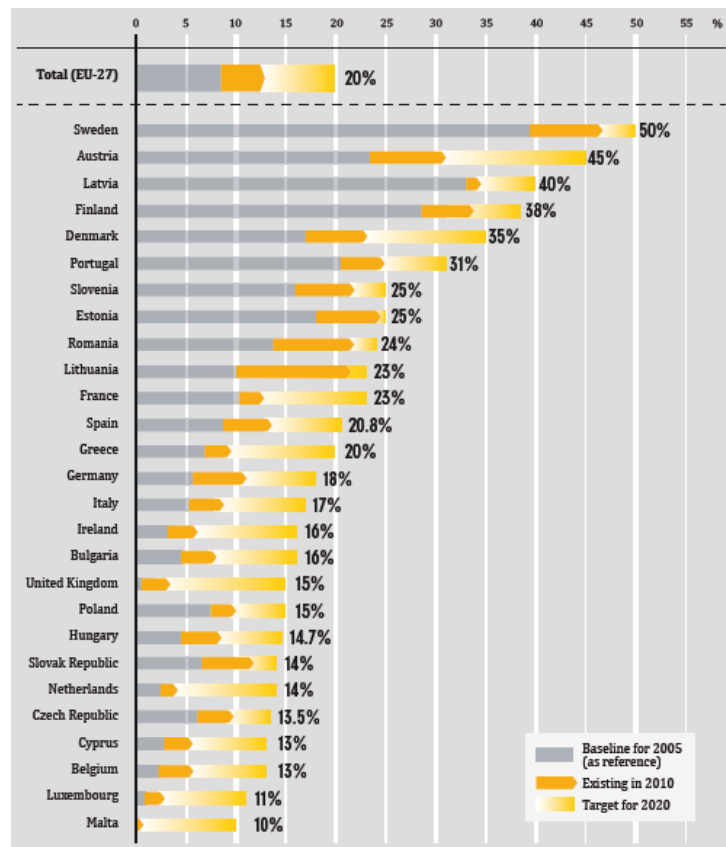


Figura 3 – metas para 2020, renováveis instaladas [5].

2.1 Energia Solar

A energia solar possui um potencial imenso. Para se ter uma ideia, estima-se que anualmente se consome cerca de 10^{14} kWh. Isto representa 1/10000 da energia enviada pelo sol à Terra. Com a implementação de mais e novas medidas para incentivo à instalação de equipamentos para o aproveitamento da energia solar, caminhamos para que esta seja a principal alternativa válida para satisfazer as necessidades futuras do planeta.

A energia solar é das diversas fontes de energia renovável, a mais abundante na Terra, sendo também uma energia inesgotável, a par da energia nuclear. Contudo, esta apresenta impactos ambientais graves, concretamente

os resíduos radioactivos. Contrariamente, a energia solar não polui o meio ambiente.

Nos últimos anos, tem existido um grande investimento em equipamentos para o aproveitamento das energias renováveis, especialmente no último ano (2011). As instalações para a produção de energia solar evidenciam um crescimento notável, em 2011 (ver figura 4).

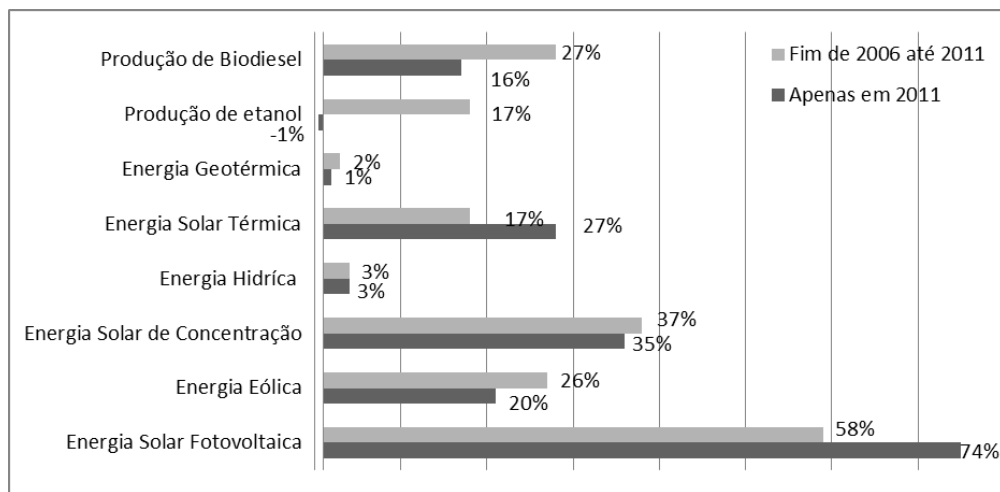


Figura 4 - crescimento das energias renováveis na Europa [5].

Em Portugal existe um plano estratégico traçado (figura 5) que deu inicialmente preferência ao investimento noutras fontes de energias renováveis. A energia hídrica foi a escolha para o primeiro investimento Português em energias renováveis, sendo o segundo a energia eólica. Só a partir de 2008, é que começaram a surgir os grandes incentivos à instalação de equipamentos para o aproveitamento da energia solar.

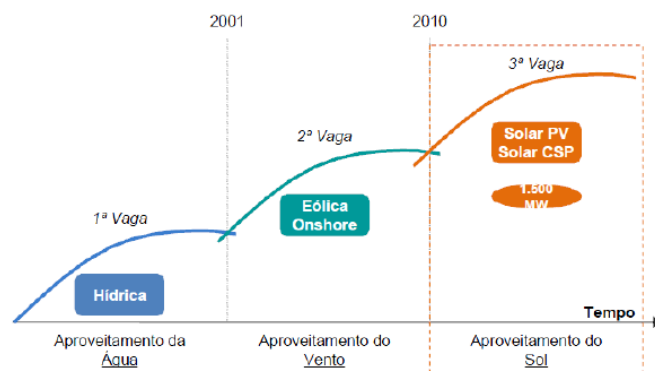


Figura 5 - vagas de desenvolvimento da política de renováveis em Portugal [6].

Contudo aposta nas outras energias renováveis não chega a ser consensual. Na primeira vaga, para o aproveitamento da energia hídrica foi necessário um grande investimento para a construção de barragens causando estas um enorme impacto ambiental. Relativamente à energia eólica existem alguns entraves.

Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados actualmente são:

- **A energia solar térmica** que aproveita a luz do sol para o aquecimento de fluidos.
- **A energia solar fotovoltaica** permite transformar a energia solar em electricidade.

2.2 Radiação solar

A radiação solar apresenta-se como uma forma de transferência de calor em que a energia é transferida de um objecto para outro. Isto pode acontecer, sem que o espaço entre ambos seja aquecido.

A intensidade da radiação solar fora da atmosfera, depende da distância entre o Sol e a Terra, que não é constante devido ao movimento de translação da Terra (ver figura 6). Mesmo assim, considera-se um valor médio, que é designado por constante solar, $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$.



Figura 6 - movimento de rotação e translação da Terra [7].

No entanto, apenas uma parte da radiação solar atinge a superfície terrestre. Isto, porque radiação disponível à superfície terrestre divide-se em três componentes, tal como se pode observar na figura 7:

- Directa: raios recebidos diretamente do Sol;
- Difusa: originada pelos raios não diretos e provenientes das nuvens, gotas de água, etc.
- Refletida: proveniente da reflexão no chão e dos objetos circundantes.

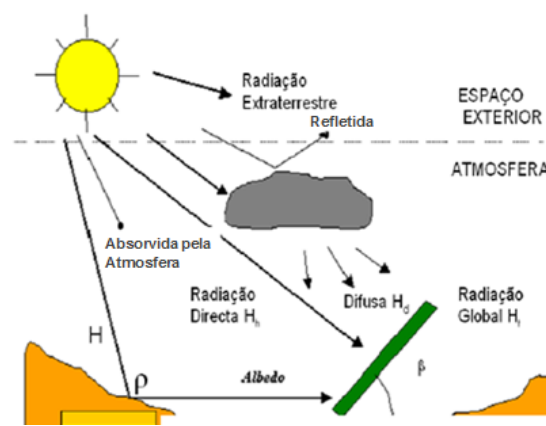


Figura 7- componentes da radiação [8].

A soma das três componentes é denominada radiação global, e representa, cerca de 1.000 W/m^2 .

É fácil perceber o potencial da energia solar, quando se observa o mapa mundial (ver figura 8). Regiões, como a América Latina, o Médio Oriente e os continentes Africano e da Oceania usufruem de uma elevada radiação solar por metro quadrado.

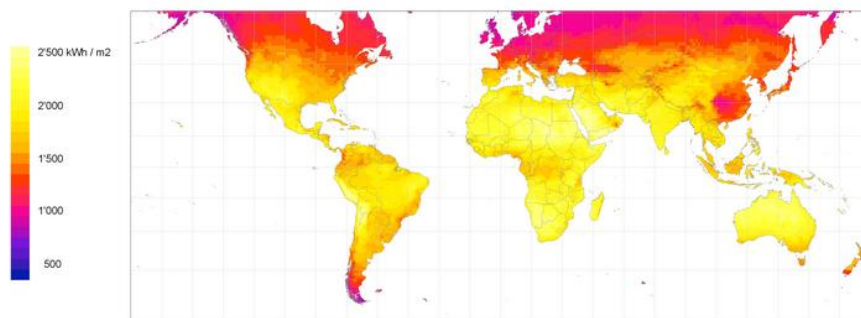


Figura 8 – radiação solar na superfície terrestre [9].

Na Europa, Portugal é dos países com maior radiação solar incidente na superfície, a par da Grécia e da Itália.

Contudo, a situação do mercado Português, contrasta com a tendência de expansão observada na maior parte dos países europeus. Onde, por exemplo da Alemanha é líder com mais de 4 milhões de m² de colectores solares térmicos, sendo a radiação solar muito inferior à nossa.

2.3 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica permite transformar a energia solar em eletricidade. Para essa transformação são utilizados módulos solares fotovoltaicos. Esta energia pode ser consumida diretamente no local de produção, armazenada ou transferida para a rede elétrica.

2.3.1 Módulos solares fotovoltaicos

Os módulos solares fotovoltaicos são dispositivos, constituídos por células fotovoltaicas ligadas em série, que transformam a radiação solar em energia eléctrica.

As células fotovoltaicas são formadas por duas camadas de materiais semicondutores (cristais de silício) onde é produzida a corrente eléctrica através do efeito fotovoltaico. O conjunto encontra-se encapsulado entre um vidro e um fundo, sobretudo para evitar a sua degradação com os factores atmosféricos (vento, chuva, poeira, vapor, etc.) e assim manter as condições ideais de operação por dezenas de anos [10]. Na figura 9, pode-se perceber a constituição de um painel fotovoltaico. Normalmente, estes dispositivos têm um tempo de vida útil de 20 a 25 anos.

O silício apresenta-se normalmente na natureza como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura.

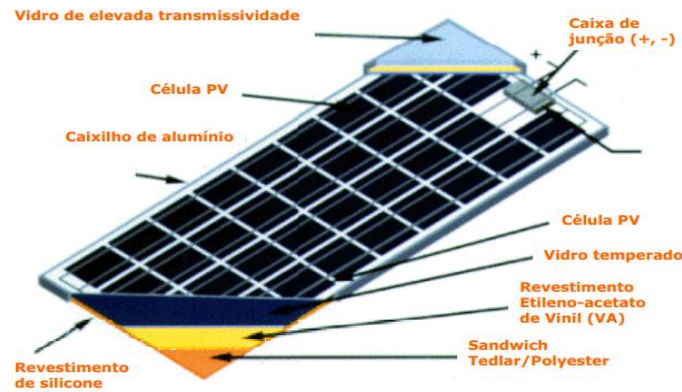


Figura 9 – constituição de um módulo fotovoltaico [11].

Sendo o cristal de silício puro um mau condutor eléctrico, uma vez que não possui electrões livres, altera-se isso, acrescentando percentagens de outros elementos, processo ao qual denomina-se dopagem. Dependendo da dopagem do silício com fósforo obtém-se um material com electrões livres ou material com carga negativa (silício tipo N). Utilizando o mesmo processo, mas acrescentando Boro, obtém-se um material com características inversas, ou seja, com défice de electrões ou material com carga positiva (silício tipo P).

As células solares fotovoltaicas são compostas por duas camadas, uma de material tipo N e outra de material tipo P. Separadas, ambas as camadas são electricamente neutras. Mas ao serem unidas, na união P-N, gera-se um campo eléctrico devido aos electrões do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P [12].

Quando a luz incide na célula fotovoltaica, os fotões que a integram chocam com os electrões da estrutura do silício dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo eléctrico criado na união P-N, os electrões são orientados e fluem da camada "P" para a camada "N", como é descrito na figura 10.

Através de um condutor externo, liga-se a camada negativa à positiva e gera-se assim um fluxo de electrões (corrente eléctrica) na conexão. Enquanto a luz incidir na célula, o fluxo de electrões manter-se-á. A intensidade da

corrente gerada variará proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente.

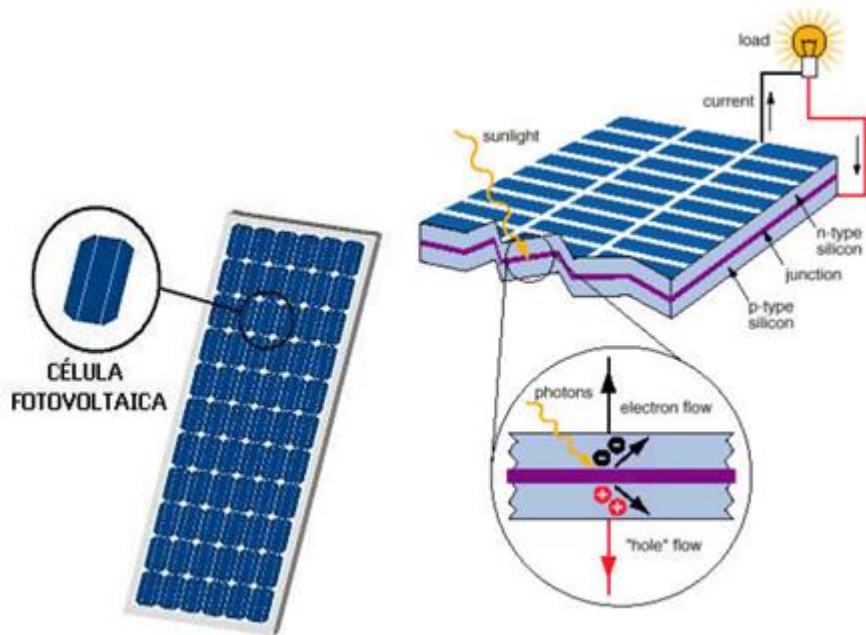


Figura 10 – descrição do funcionamento de uma célula fotovoltaica [13].

2.3.2 Tipos de células

Actualmente existe uma grande aposta no desenvolvimento e melhoramento das células fotovoltaicas. Porém estas dividem-se principalmente em três tipos de células solares, sendo elas:

- Células solares monocristalinas;
- Células solares policristalinas;
- Células solares de silício amorfo.

As células monocristalinas representam a primeira geração e apresentam um rendimento na ordem dos 12 a 15%.

Contudo as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras, sendo necessária uma grande quantidade de energia para o seu fabrico. Isto deve-se, à necessidade de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita.

As células policristalinas têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia no seu fabrico, mas apresentam um rendimento inferior às monocristalinas. O menor rendimento deve-se à imperfeição do cristal.

As células de silício amorfo são as que apresentam o custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento é também o mais reduzido comparativamente às restantes. Através da tabela 1, pode-se analisar o rendimento das diferentes células fotovoltaicas.

Tabela 1 – rendimento das células fotovoltaicas [13].

Células solares	Rendimento típico [%]	Máximo registado em aplicações [%]	Rendimento máximo registado em laboratório [%]
Monocristalino	12 - 15	22,7	24,0
Policristalino	11 - 14	15,3	18,6
Silício amorfo	6 - 7	10,2	12,7

Segundo a figura 11, o rendimento das células depende da posição com ângulo de incidência dos raios solares. Estas obtêm o seu máximo rendimento quando se encontram perpendiculares à radiação solar, diminuindo a intensidade de corrente produzida quando o ângulo de incidência também diminuiu.

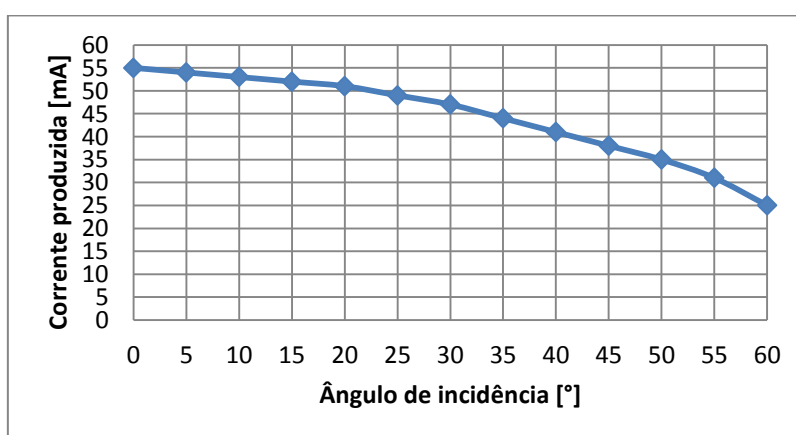


Figura 11 - corrente produzida com a variação do ângulo de incidência [14].

Nos dias de hoje, a experiência adquirida na produção de células solares tem vindo a reduzir o custo das mesmas, indicador que este tipo de

energia será tendencialmente mais utilizado. Não só tem existido uma grande aposta no seu desenvolvimento, como cada vez mais surgem novos fabricantes deste tipo de produtos. Analisando a figura 12, verifica-se que atualmente a China lidera o mercado, produzindo 57,3%, mais de metade das células fotovoltaicas comercializadas.

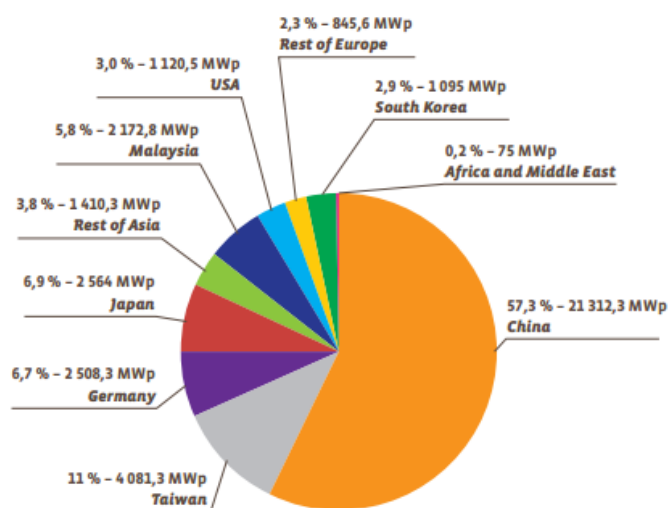


Figura 12 - principais produtores de células fotovoltaicas [15].

2.4 Energia Solar Térmica

A energia solar térmica, aproveita a energia proveniente do sol para o aquecimento de águas sanitárias e climatização. O princípio de funcionamento deste sistema baseia-se no efeito de estufa. A água é aquecida através da radiação solar captada por um ou mais painéis solares ou coletores solares. A radiação penetra na cobertura do painel solar e concentra o calor no seu interior, transferindo-o para o fluido que circula nas tubagens, tal como se observa na figura 13 [16].

Desde 2008, tornou-se obrigatório em Portugal, a implementação destes equipamentos em novos edifícios. Prevê-se que em 2020/2030, exista 1m² de coletor solar por habitante.

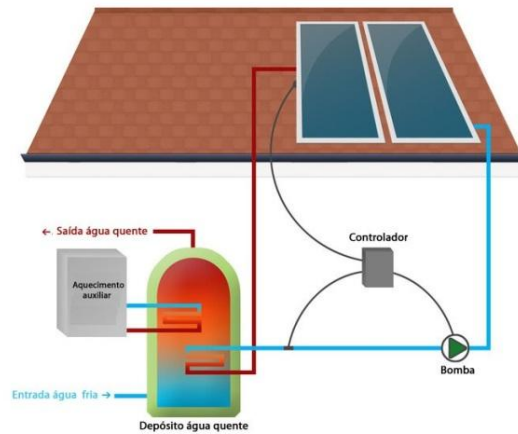


Figura 13 – funcionamento de um sistema solar térmico [17].

É importante referir que estes sistemas precisam de funcionar juntamente com o sistema convencional de produção de água quente. Isto, porque num dia nublado, não haverá radiação suficiente para o coletor aquecer a água.

Para uma gama de temperaturas acima dos 90°C , torna-se possível a produção de energia eléctrica com utilização de coletores concentradores solares. Estes equipamentos geram vapor e depois com o auxílio de uma turbina produz-se energia mecânica, que posteriormente, através de um gerador, electricidade. Normalmente, este tipo de sistemas é utilizado em centrais solares, porque é preciso ter um grande número de equipamentos para conseguir ter rentabilidade [18]. Exemplo disso é umas das mais recentes centrais solares, situada em Espanha e representada pela figura 14.



Figura 14 - central solar Gemasolar em Espanha [19].

Esta é diferente das centrais solares clássicas porque é capaz de produzir energia durante a noite, devido ao diferente tipo de armazenamento. A energia é armazenada num enorme recipiente de sais dissolvidos, a uma temperatura superior a 550 graus. Depois, os sais produzem vapor e este acciona uma turbina, que gera electricidade.

2.5 Seguidores solares

Os seguidores solares são dispositivos que seguem o movimento do sol ao longo do dia, de este a oeste, aumentando a produção dos módulos fotovoltaicos, conforme indica a figura 15. Assim, consegue-se aumentar o rendimento do sistema, uma vez que a incidência dos raios solares é perpendicular aos módulos.

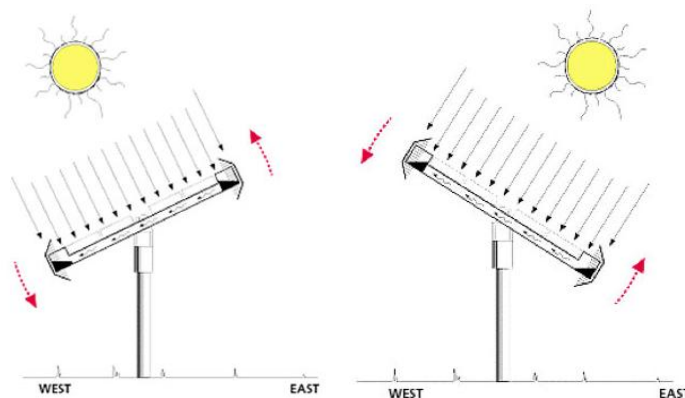


Figura 15 – seguimento do sol através de um seguidor solar [20].

2.5.1 Tipo de seguidores solares

No geral, existe dois tipos de equipamentos, que permitem o movimento de acordo com a deslocação do sol:

- Seguidores solares de dois eixos;
- Seguidor solar de um eixo.

Os seguidores solares de dois eixos permitem seguir o sol de forma mais precisa e eficiente (ver figura 16). Estes sistemas de seguimento solar, naturalmente, têm um melhor desempenho, uma vez que permitem ao seguidor

posicionar as células solares directamente perpendicular aos raios solares durante todo o percurso do sol.



Figura 16 - seguidor solar de dois eixos [21].

Estes seguidores são mais complexos do ponto de vista técnico e concetual do que os de um eixo, e consequentemente um preço superior, factores que fazem com que sejam muitas vezes preteridos.

A diferença de rendimento dos entre os seguidores é mais notória em latitudes maiores. Essa diferença existe devido ao facto de nessas zonas, a variação sazonal ter uma maior influência no percurso do sol, segundo indica a figura 17.

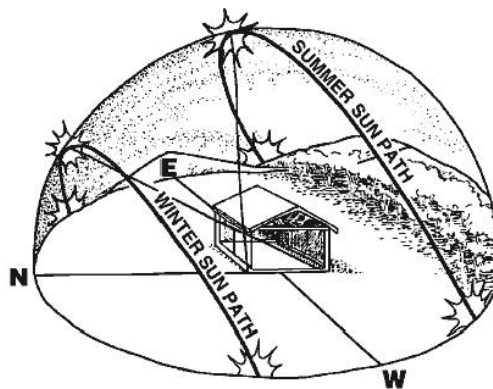


Figura 17 - variação do percurso do sol durante o dia nas estações do ano [21].

Os seguidores solares de um eixo são assim designados, porque o plano do mecanismo gira em torno de um único eixo. Dentro deste género de seguidor existem dois tipos de seguidores:

- Seguidor solar de um eixo horizontal;

- Seguidor solar de um eixo polar.

O seguidor de um eixo horizontal representado na figura 18 tem os painéis paralelos à superfície. Estes são adequados para zonas, com latitudes pequenas próximas do equador.

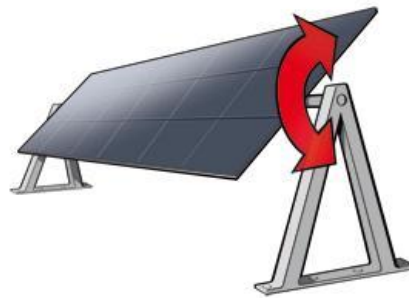


Figura 18 - seguidor solar de um eixo horizontal [21].

O seguidor de um eixo polar, demonstrado na figura 19, caracteriza-se por criar uma determinada inclinação com a superfície. Estes apropriam-se para zonas de grandes latitudes.



Figura 19 - seguidor solar de um eixo polar [21].

Alguns destes sistemas, já permitem a alteração do ângulo de inclinação. A alteração do grau de inclinação pode oscilar entre os 35° adequados à temporada de Inverno, até aos 20° para o Verão. Contudo, o grau de inclinação pode ser seleccionado em qualquer altura do ano, em função da estação do ano e da latitude em que esteja localizada o seguidor [22].

Um sistema fotovoltaico com um seguidor solar de dois eixos apresenta um rendimento anual 25 a 40% superior relativamente às estruturas fixas

(passivas), dependendo da zona da instalação do seguidor. Estes mostram maior rendimento, sobretudo ao nascer e ao pôr-do-sol, como é possível concluir com a observação da figura 20. A figura representa a percentagem de energia produzida ao longo do dia. Verifica-se que as estruturas fixas são as menos eficientes, seguidas dos seguidores de um eixo.

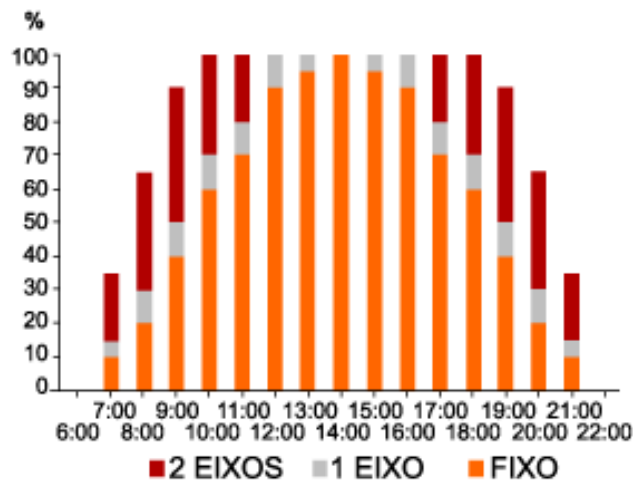


Figura 20 - rendimento das diferentes estruturas solares [23].

2.6 Microgeração

A microgeração é uma forma de produzir energia elétrica, em pequena escala, utilizando equipamentos de energias renováveis ligados à rede pública. Normalmente, este processo fornece eletricidade a habitações, empresas ou pequenas comunidades para satisfazerem as necessidades próprias.

A grande vantagem destas instalações é a possibilidade de vender o “excesso” de energia à rede pública, podendo assim o produtor gastar a própria energia e ainda obter algum lucro através da sua venda. Segundo a figura 21, os painéis fotovoltaicos estão ligados contador de produção, onde depois existe uma portinhola onde se pode seleccionar consumir a energia ou vender à rede.

Este é um sistema cada vez mais usual, no entanto antes de avançar para a instalação de um sistema destes é necessário conhecer as leis com que se regem estes sistemas e todas as leis necessárias para a colocação dos

sistemas a funcionar de acordo com os decretos de leis presentes no país. O Governo criou planos para beneficiar os produtos e incentivar à sua adesão [24].

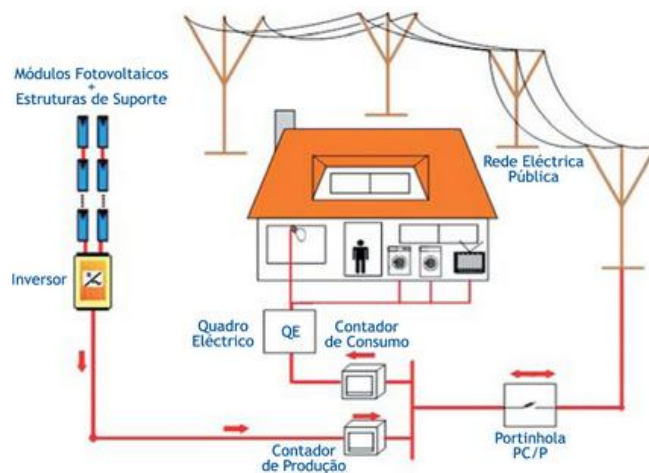


Figura 21 - sistema para produção de energia.

Em Portugal calcula-se que num ano, em média, 4 horas de sol por dia são aptas para a produção fotovoltaica (6 horas no Verão e 2 horas no Inverno). Este valor é multiplicado pelo valor da potência instalada e assim obtém-se a produção da energia diária em sistemas fixos.

Segundo a Tabela 2, um produtor individual terá direito a um regime bonificado se não ultrapassar 3,84 kW. Caso contrário, a tarifa de venda à rede seguirá o regime geral que é menos vantajoso, visto o preços de venda serem iguais ao preço de compra.

Tabela 2 – tarifa de venda à rede no regime bonificado em 2012 [25].

	Regime bonificado	Regime geral
Primeiros 8 anos	0,326 €/kWh	Preço de venda igual ao preço de compra
7 anos seguintes	0,185 €/kWh	
A partir do 16º ano	Preço de venda igual ao preço de compra	

Para ter uma ordem de grandeza, um sistema com uma potência de 3,68 kW (máxima potência para instalações particulares em regime bonificado)

produz $4h \times 3,68 \text{ kW} = 14,72 \text{ kWh} / \text{dia}$. Por ano, isto significa uma produção de 5,37MWh que se traduz em cerca de 1.750€/ano ou cerca de 150€/mês. A utilização de um seguidor de solar de 2 eixos pode aumentar a produção referida, em cerca de 25-40% [25].

2.7 Mercado energético [5]

Contrariando um cenário competitivo cada vez mais agressivo, os investimentos em energias renováveis (excluindo as grandes hidroelétricas) aumentaram 17%, atingindo um recorde de 199 bilhões de euros, um aumento seis vezes superior aos números de 2004 e 94% mais altos do que o total em 2007, o ano antecedente à crise financeira mundial [26].

Embora o aumento de 17% do ano passado tenha sido menor que o aumento de 37% registado em 2010, este foi atingido mediante um cenário de profunda crise na Europa e num período de queda nos preços dos equipamentos para energias renováveis.

Os preços dos módulos fotovoltaicos caíram aproximadamente 50%, Estas variações impulsionaram esta tecnologia renovável para uma maior competitividade com os combustíveis fósseis, como o carvão e gás. A energia solar tornou-se a preferência dos consumidores em 2011, ultrapassando a energia eólica, tendo mesmo atraído quase o dobro do investimento. Isto conduziu o setor a mais um ano de quebra de recordes. O investimento total em energia solar aumentou 52% atingindo os 114 bilhões de euros. Os desafios para competitividade foram intensificados, provocando quedas nítidas nos preços, especialmente no mercado solar – um benefício para compradores.

O mercado da energia solar fotovoltaica viu mais um ano de crescimento extraordinário. Quase 30GW para produção de energia fotovoltaica, entraram em funcionamento em 2011 passando a capacidade de produção para 70 GW, um aumento de 74% face ao ano anterior, como se observa pela figura 22.

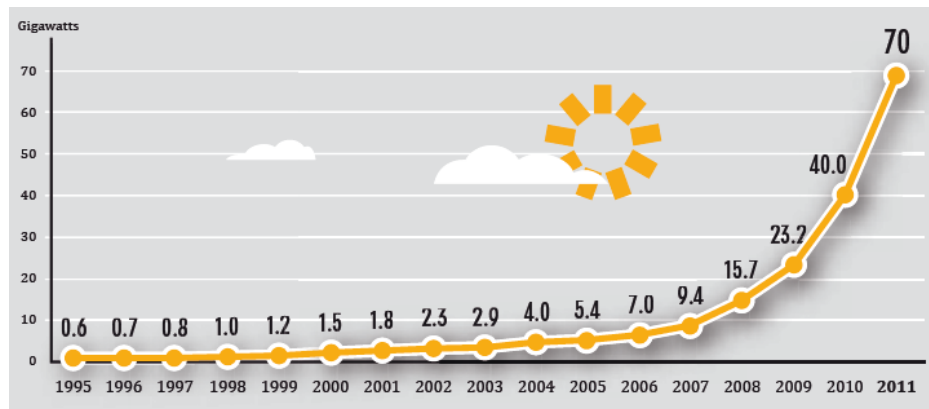


Figura 22 – energia solar fotovoltaica instalada a nível mundial [5].

Aumentou de três para seis, o número de países que adicionaram mais de 1 GW à sua rede elétrica, e a construção de novas instalações continua a crescer. Como se observa na figura 23, no topo dos países com maior capacidade de produção fotovoltaica estão: Alemanha, Itália, Japão, Espanha, seguida dos Estados Unidos.

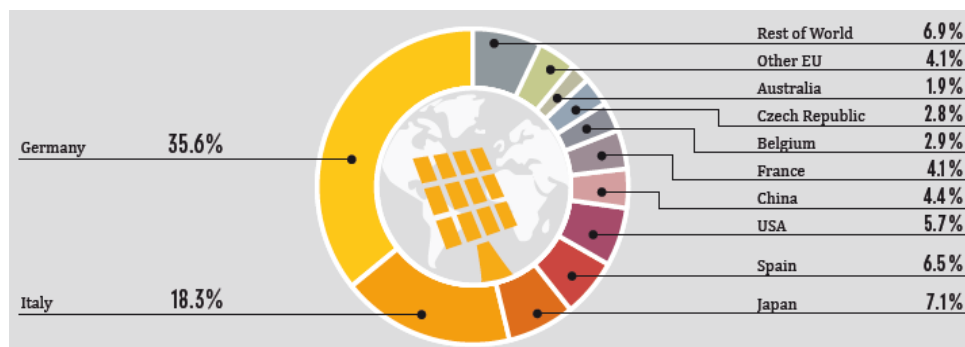


Figura 23 – 10 maiores produtores de energia fotovoltaica [5].

A União Europeia voltou a dominar o mercado mundial fotovoltaico, graças a Itália e a Alemanha, que juntos representaram 57% da capacidade operacional instalada em 2011. Estima-se que a União Europeia instalou 22 GW e ligou quase 17 GW à rede. Esta foi responsável por quase três quartos da potência mundial instalada, e produziu o suficiente para alimentar cerca de 15 milhões de casas. Pela primeira vez, energia solar fotovoltaica representou mais do que qualquer outro tipo de tecnologia na produção de energia elétrica. Só a energia solar fotovoltaica representou quase 47% de toda a nova capacidade elétrica que entrou em funcionamento em 2011, na União Europeia.

Fora da Europa, os maiores investidores foram a China (2,1 GW), os Estados Unidos (1,9 GW), Japão (1,3 GW) e Austrália (0,8 GW)

O Japão continua em terceiro lugar globalmente para a capacidade operacional total. Até 2010, sistemas privados/residenciais representaram 95% da energia solar fotovoltaica do Japão.

Nos Estados Unidos, a descida dos preços dos módulos fotovoltaicos combinado com o incentivo do estado, a extensão de incentivos federais, e a iminente expiração de outros, resultou na duplicação do mercado, elevando a capacidade operacional para quase 4 GW. A Califórnia continua a ser o estado com maior produção (29%), seguido por *New Jersey* (17%) e *Arizona* (15%). As instalações comerciais representam a maior parcela (43%) da produção americana. No entanto, os privados representam uma fatia pequena, cerca de 16%.

A China subiu de oitavo para sexto lugar e o seu mercado quase quadruplicou em 2011, muito em resposta à introdução de um incentivo nacional, trazendo a capacidade de produção para quase 3,1 GW. A China emergiu rapidamente como o país dominante na Ásia, representando cerca de 50% do investimento realizado em 2011 no continente Asiático.

O Canadá (364 MW) e a Índia (300 MW) foram outros países que registaram um crescimento notável, mais do que duplicaram a sua capacidade de produção de energia fotovoltaica.

Estima-se que globalmente há mais de 5 milhões de empregos nas indústrias de energia renovável, e o potencial para criação de empregos continua a ser o estímulo principal para o desenvolvimento das políticas referentes às energias renováveis.

2.9 Análise de mercado

Existem no mercado de estruturas para produção de energia solar, uma grande oferta de equipamentos mas pouco diversificada. Relativamente aos seguidores solares para cobertas, não se encontram muitas soluções no mercado. Pela pesquisa elaborada, encontrou-se três seguidores para esse propósito.

Para que este produto seja uma aposta viável, não poderá chegar ao mercado com menos potencialidades do que os já existentes. O produto projetado deverá, face à concorrência, trazer algum valor acrescentado, ou pelas mesmas características, apresentar um preço inferior.

A empresa espanhola *Sendekia* lançou em 2010, na Feira de Inovação de Genebra, um seguidor solar para coberturas (figura 24) que foi considerado o seguidor solar mais inovador do mercado.



Figura 24 – seguidor solar para coberturas comercializado pela *Sendekia*.

Apesar de não ser perceptível na figura 24, este seguidor possui um conjunto de quatro rodas, que circulam sobre um carril, sendo uma roda acionada por um motor elétrico permitindo a rotação da estrutura. O sistema de rodas é rígido, sendo composto por uma roda para suportar o peso da estrutura e outra para não permitir o descarrilamento. Contudo, este sistema não prevê a dilatação térmica, que pode provocar esforços não previstos na estrutura e provocando o seu encravamento, quando existir uma grande variação de temperatura. A utilização de apenas um motor pode comprometer o bom funcionamento da estrutura. Esta escolha apenas se justifica economicamente.

Os painéis movimentam-se a partir de um atuador linear situado num dos lados da estrutura, o que não promove o equilíbrio da estrutura.

Este seguidor não possui nenhum mecanismo/dispositivo que impeça o movimento ascendente da estrutura devido à ação da carga do vento

A marca *Texnometaliki* apresenta uma solução (ver figura 25) na qual, um carril assenta num conjunto formado por um rolo e uma roda, onde o rolo sustenta o peso da estrutura e a roda restringe o carril, não permitindo a sua deslocação ascendente com a acção do vento. Com o recurso a uma corrente fixa à base circular e um motor que é independente à estrutura (serve de esticador para a corrente) faz-se a rotação do seguidor. Estes mecanismos de funcionamento podem ser verificados através da figura 26.

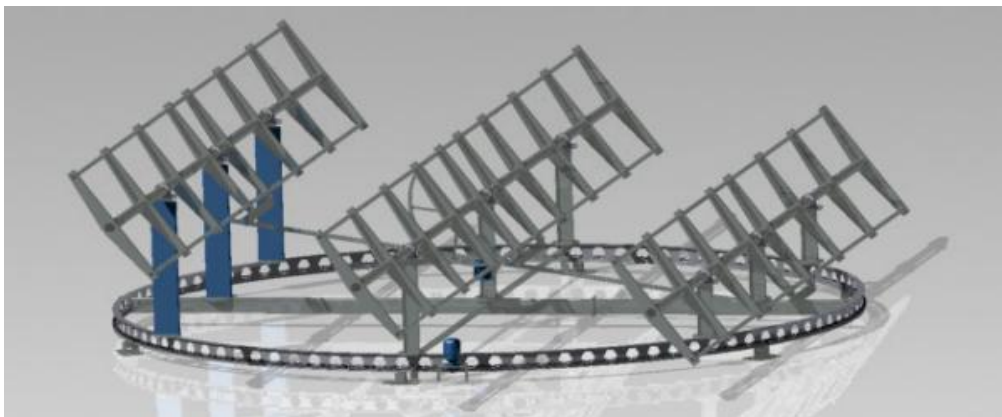


Figura 25 - seguidor solar da *Texnometaliki*.

Através de um sistema pinhão-cremalheira realiza-se o movimento basculante dos painéis. Este mecanismo é no entanto, bastante espaçoso.

A altura dos painéis fotovoltaicos ao solo é diferente. Isto significa, por um lado que os pilares têm alturas diferentes, elevando o custo do processo de fabrico, mas por outro, a distância entre pilares é menor, porque devido às diferentes alturas, a sombra não causa interferência, podendo assim a dimensão global da estrutura ser menor.

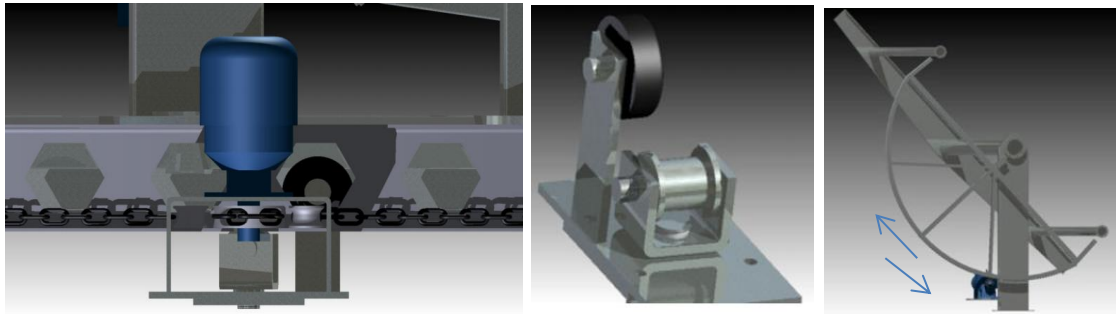


Figura 26 – sistemas mecânicos do seguidor solar da *Texnometaliki*.

A empresa espanhola, Soportes Solares, tem na sua lista de produtos, um seguidor solar que utiliza um atuador linear para movimentar os módulos. Tal, como o modelo anterior, também este caracteriza-se pelas diferentes alturas ao solo dos painéis.

Este necessita de um pivô central para assegurar a sua fixação ao solo. A rotação da estrutura é realizada recorrendo a uma cremalheira, que serve também de apoio e guia às rodas. O motor incorporado na estrutura possui um pinhão na sua saída que em contato com cremalheira, promove a rotação da estrutura.

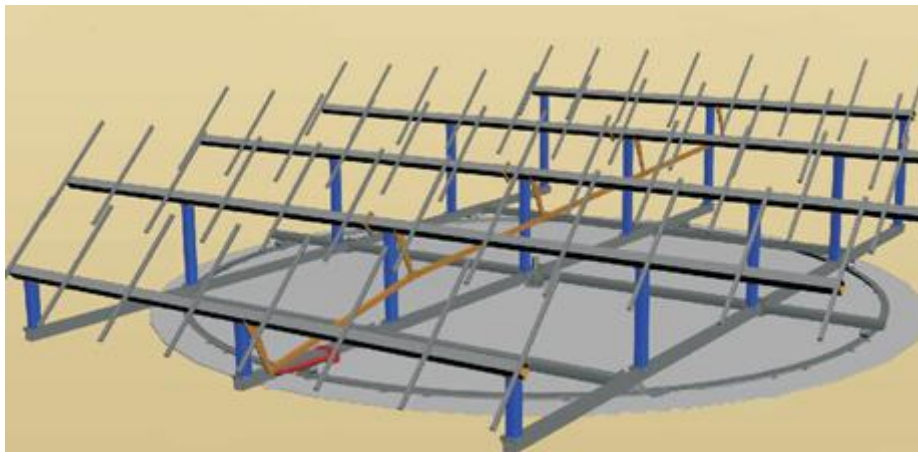


Figura 27 - seguidor solar da empresa *Soportes Solares*.

Com os dados obtidos através da análise destes seguidores solares, elaborou-se a tabela 3, o que torna mais fácil ter uma noção dos requisitos que o sistema deverá possuir.

Tabela 3 – características dos seguidores anteriormente apresentados.

Modelo	Área de exposição m ²	Velocidade de funcionamento [km/h]	Velocidade de rajada [km/h]	Ângulo de inclinação	Ângulo de rotação
1 Sendekia	28	60	200	60°	270°
2 <i>Texnometaliki</i>	40	60	120	65°	270°
3 <i>Soportes Solares</i>	80	50	120	30°	360°

Conforme os dados apresentados, verifica-se que as estruturas apresentam áreas de exposição solar diferentes, significando que estas albergam um número de painéis solares fotovoltaicos distinto. Contudo, em todas elas essa área pode mudar, dependendo das dimensões do painel que o comprador optar. As velocidades de funcionamento são semelhantes, contudo a velocidade de rajada é bastante superior no modelo 1, uma vez que essa estrutura foi dimensionada segundo um critério diferente. O modelo 1 foi dimensionado pela norma Espanhola CTE DB SE-AE, que prevê cargas menos gravosas do que as obtidas pelos Eurocódigos. O ângulo de inclinação é diferente em todas as soluções. Consegue-se obter aproveitamento da radiação solar, até quando o sol se encontra a 30° com superfície terrestre [27], significando que a inclinação máxima ideal seja 60°.

Capítulo 3

3 Projeto estrutural

Nesta etapa deve-se estabelecer todas as especificações técnicas pretendidas para o seguidor, de modo a tornar possível a definição da estrutura e assim proceder a todos os dimensionamentos e cálculos, assim como realizar a seleção de todos os componentes necessários ao funcionamento do seguidor.

3.1 Especificações técnicas

Antes de iniciar o dimensionamento propriamente dito da estrutura, é necessário estabelecer alguns parâmetros, como o número de painéis que suportará a estrutura, a distribuição as suas dimensões

As dimensões do seguidor dependem da potência que se pretende instalar, visto a potência estar diretamente ligada com a quantidade de painéis. Em norma, um painel fotovoltaico tem uma potência que varia entre os 160 a 240 W.

O objetivo deste produto é que possa ser disponibilizado no mercado para o maior leque de consumidores possível, desde clientes individuais a coletivos. Assim, sabendo através dos dados fornecidos pela tabela que a potência máxima permitida para um consumidor individual é 3,84 kW em regime bonificado, o que equivale a cerca de 20 painéis, considerando os painéis menos potentes. Todavia os consumidores individuais também podem instalar os painéis mais potentes, deixando assim de usufruir do regime bonificado, passando para o geral. Estas condições mantêm-se, desde que a potência total não ultrapasse os 5,4 kW.

Com as dimensões de um dos modelos mais comercializados, como é o caso do painel da figura 28, calculou-se a distância necessária entre filas de

painéis para que a sombra não interfira com as outras filas durante o funcionamento, até os painéis atingirem a sua inclinação máxima 60° .

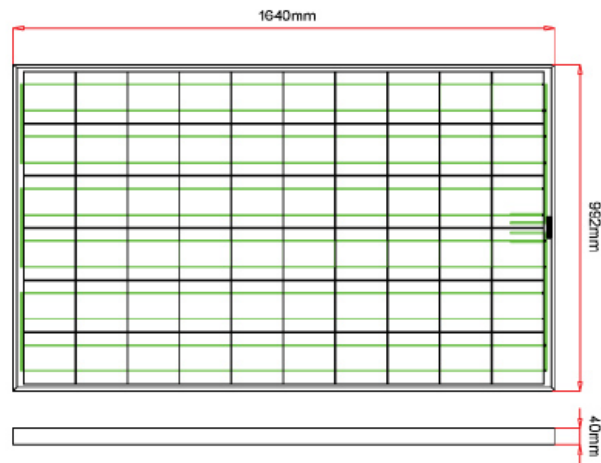


Figura 28 – dimensões de um painel solar.

Para estas dimensões de painéis, é necessário existir um espaçamento de dois metros entre cada fila de painéis, para garantir que não haja sombra nas restantes filas, conforme se observa na figura 29.

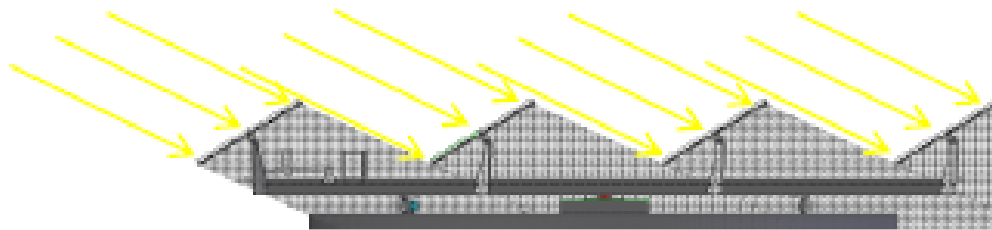


Figura 29 – sombra resultante da incidência dos raios solares na estrutura.

Assim, fez-se na tabela 4 a relação entre o número de filas e o número de painéis por fila, de modo a otimizar a estrutura afim desta ocupar a menor área possível. Depois de realizados os cálculos, verifica-se que a opção de quatro filas, cada uma com cinco painéis é a solução que ocupa a menor área, logo esta será esta a base utilizada para o dimensionamento da estrutura.

Tabela 4 – especificação da estrutura.

Nº de filas	Nº de painéis por fila	Área de exposição [m ²]	Dimensões [m]	Área de ocupação [m ²]
3	4	33	11,5 x 6,2	71,3
4	5		8,2 x 6,4	52,48
5	4		6,6 x 8,2	54,12

3.2 Eurocódigos

Para o dimensionamento de estruturas metálicas é necessário calcular os coeficientes de carga referentes ao vento e à neve. Estes coeficientes dependem da zona onde se instala o seguidor. Em geral, definem-se determinadas zonas, nas quais os seguidores poderão ser instalados. Para essas áreas de instalação, considera-se os valores mais gravosos que incidem na estrutura.

Neste caso em concreto, os cálculos necessários para obter os coeficientes de carga, anteriormente referidos, são obtidos a partir das seguintes normas europeias:

- EN 1991-1-3 Eurocódigo 1: Ações em Estruturas – Parte 1-3: Ação da neve
- EN 1991-1-4 Eurocódigo 1: Ações em Estruturas – Parte 1-4: Ação do vento
- EN 1993-1-1 Eurocódigo 3: Projeto de Estruturas de Aço

Ora, estas normas europeias pretendem unificar critérios, normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas. A este conjunto de normas chama-se eurocódigos, documentos aos quais é necessário recorrer para a realização dos cálculos.

3.2.1 Carga do vento

O vento é umas das forças que condicionada a instalação destes equipamentos, uma vez que as condições variam conforme o local (figura 30).

Neste prisma, é necessário definir uma zona de funcionamento para o seguidor e calcular as cargas às quais poderá estar sujeito.

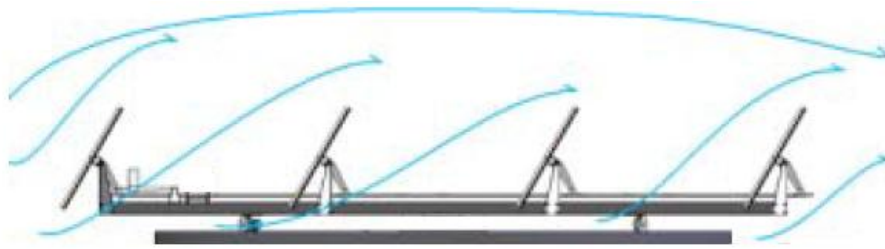


Figura 30 – comportamento do vento sobre os painéis.

Ao definir as condições de trabalho do seguidor, é preciso distinguir duas situações:

- Em estado estacionário.
- Em funcionamento.

Considera-se estado estacionário, quando o seguidor não está em funcionamento e tem os painéis solares em posição de “descanço”. Nesta situação a estrutura está sujeita à carga máxima, ou seja, à pressão dinâmica de pico, que é dada pela seguinte equação:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (1)$$

Em que:

- $c_e(z)$ — coeficiente de exposição;
- q_b — pressão dinâmica de referência;
- v_m — velocidade média do vento;
- $I_v(z)$ — intensidade de turbulência;
- ρ — massa volúmica do ar.

Porém antes deste cálculo é necessário calcular o valor de referência da velocidade do vento é dado pela seguinte expressão:

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} \quad (2)$$

Onde:

$v_{b,0}$ — valor básico da velocidade de referência do vento (tabela 4);

c_{dir} — coeficiente de direção;

c_{season} — coeficiente de sazão.

Para o valor do coeficiente de direção e de sazão é aconselhado a utilização do valor 1,0 para ambos. A tabela 5 descreve o valor básico da velocidade de referência do vento para duas zonas.

Tabela 5 – valor básico da velocidade de referência do vento.

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

sendo:

Zona A – a generalidade do território nacional, exceto as regiões pertencentes à zona B;

Zona B – os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou altitudes superiores a 600 m.

Considerando a instalação do equipamento na zona B, têm-se que o valor de referência da velocidade do vento é:

$$v_{b,0} = 30 \text{ m/s}$$

.Após o cálculo deste valor, têm-se que calcular a velocidade média do vento, que é dada por:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (3)$$

em que:

$c_o(z)$ — coeficiente de orografia, considerado igual a 1,0;

$c_r(z)$ — coeficiente de rugosidade.

O coeficiente de rugosidade do terreno é dado pela seguinte expressão:

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4)$$

sendo:

z_0 — comprimento de rugosidade;

k_r — coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade e é calculado a partir de:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (5)$$

em que:

$$z_{0,II} = 0,05 \text{ (categoria de terreno II)}$$

Consultando o quadro 1 do anexo A, definiu-se que o seguidor funcionaria em zonas semelhantes à categoria de terreno II. Assim, resulta num coeficiente de terreno igual a: 0,19.

Para o cálculo do coeficiente de rugosidade do terreno, através da equação 4, é necessário saber a altura acima do nível do solo onde o seguidor irá operar. Dado que o eurocódigo não esclarece, se é possível considerar o piso do edifício como o solo, decidiu-se estabelecer uma altura máxima, referente a um edifício de cinco andares, que equivale a uma altura de 17 m. Assim, têm-se que:

$$c_r(z) = 1,12$$

O que resulta numa velocidade média de:

$$v_m(z) = 33,23 \text{ m/s}$$

Para obter o valor da pressão dinâmica de pico, ainda é necessário calcular o valor da intensidade de turbulência

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (6)$$

em que:

k_1 – coeficiente de turbulência, o valor recomendado é 1,0;

σ_v – desvio padrão da turbulência

Resultando,

$$I_v(z) = 0,172$$

Deste modo e sabendo que a massa volúmica do ar é igual a 1,25, têm-se todos os dados necessários para o cálculo do valor da pressão dinâmica de pico:

$$q_p(z) = 1519 \text{ Pa}$$

A este valor, é necessário aplicar os valores de coeficiente de força global que relacionam o escoamento do vento em torno da estrutura. C



Figura 31 – sem obstáculos $\phi = 0$.

Consultando o quadro 2 do anexo A, retira-se os valores de coeficiente de força global para a situação acima referida (figura 31). A tabela 6 resulta do cálculo da pressão dinâmica de pico com os coeficientes de força global, na qual se obtém os valores

Tabela 6 – pressão dinâmica de pico aplicar.

Pressão dinâmica de pico q_p [pa]	Coeficiente de força global c_f	Pressão dinâmica de pico influenciada [pa]
1519	+ 0,2	+ 304
	- 0,5	- 759

Em funcionamento, a estrutura estará sujeita a uma carga menor. De acordo com a tabela 3, os equipamentos concorrentes estabelecem como velocidade máxima de funcionamento 60 km/h. Para determinar essa carga determina-se a pressão dinâmica, pela seguinte expressão:

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (7)$$

Em que:

v – velocidade máxima de funcionamento;

ρ – massa volúmica do ar.

Resultando uma pressão dinâmica de 172 Pa. Contudo, para as diversas posições de funcionamento, a carga é afetada por um coeficiente de força global que pode ser consultado no quadro 2 do anexo A. Na tabela 7 encontram-se os valores de pressão dinâmica influenciados pelos coeficientes de força global correspondentes a cada posição dos painéis.

Tabela 7 – pressão dinâmica influenciada pela inclinação da cobertura [Pa]

Pressão dinâmica [Pa]	Pressão dinâmica influenciada pela inclinação da cobertura [Pa]						
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	60°
172	69	86	121	138	172	207	310
-172	-121	-155	-189	-224	-276	-310	-310

3.2.2 Carga da neve

O cálculo da carga da neve determina a carga máxima de neve que o seguidor deverá suportar, dentro de uma área definida para a sua instalação (figura 32). Segundo o Eurocódigo considera-se a neve uma carga estática.



Figura 32 – seguidor solar sujeito à carga da neve.

Atráves da seguinte equação, consegue-se obter o valor da carga de neve:

$$s_k = C_z [1 + (H/500)^2] \quad (8)$$

Em que:

- C_z - Coeficiente dependente da zona;
- H - altitude do local (m).

Consultando a figura 33, percebe-se que a maior parte do território nacional é representado pelas zonas Z_2 e Z_3 . A tabela 8 refere qual o coeficiente adoptar para cada zona.

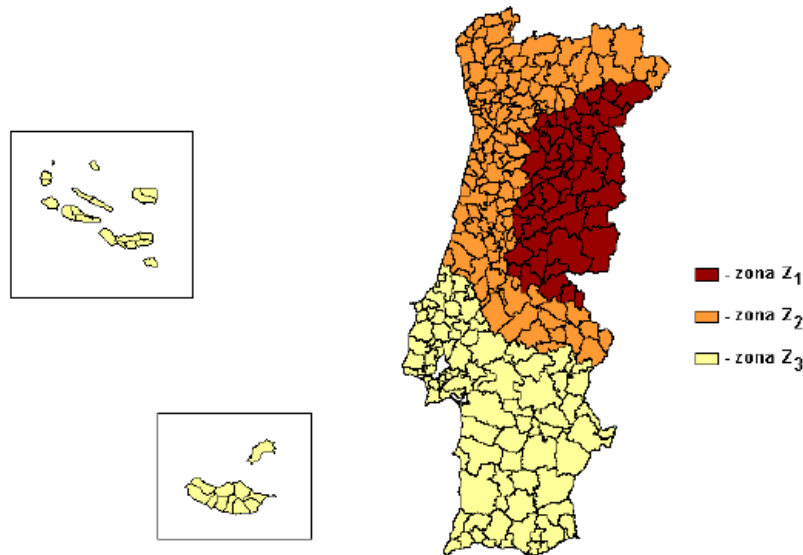


Figura 33 – divisão do território nacional para determinação de coeficiente de carga de neve.

Tabela 8 – coeficientes dependentes da zona.

Zonas	Coeficiente
Z_1	0,30
Z_2	0,20
Z_3	0,10

Para uma instalação nas zonas Z_2 e Z_3 , numa altitude de 600 metros o obtêm-se um valor para a carga de neve a nível do solo de $0,49 \text{ kN/m}^2$.

3.3 Dimensionamento

No dimensionamento da estrutura utilizou-se o *software*, *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012*. Este permite a análise estrutural através do método dos deslocamentos.

O método dos deslocamentos permite obter diagramas de esforços através da determinação das deformações sofridas pelos nós das barras da estrutura.

O primeiro passo na utilização deste *software* fazer a modelação 3d da estrutura, conforme idealizada, através de eixos médios (ver figura 34). Contudo, essa modelação irá sofrer bastantes alterações no decorrer do dimensionamento.

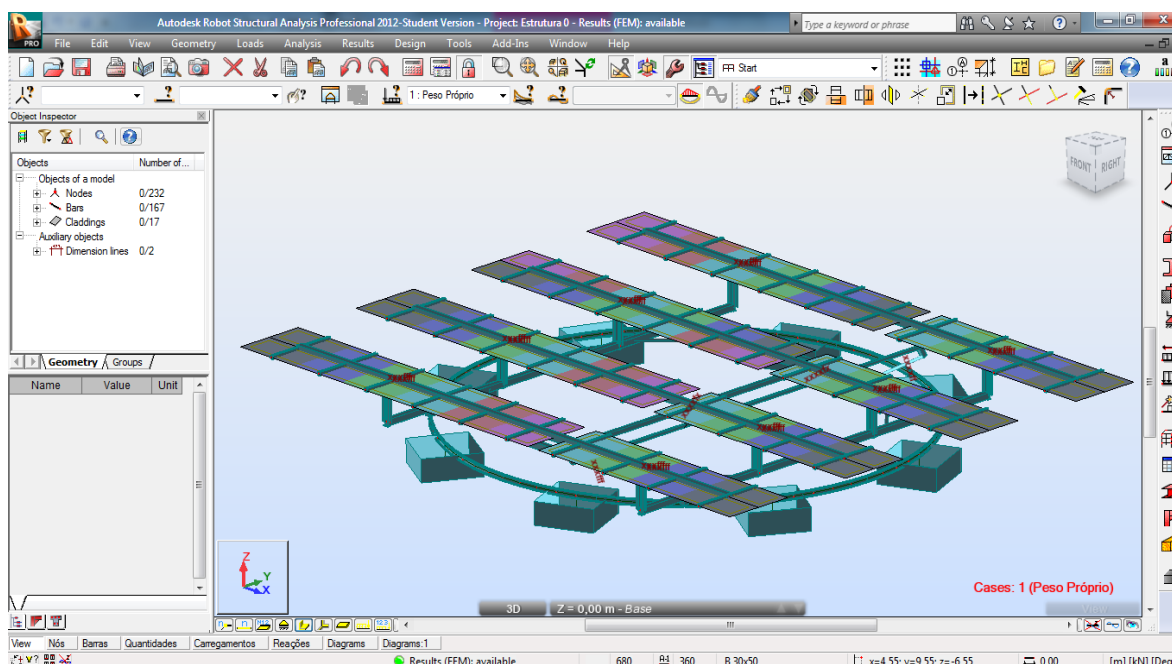


Figura 34 - ambiente gráfico do *software Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012*.

Após a modelação, criaram-se grupos/famílias, associando elementos sujeitos às mesmas condições e com as mesmas funções. Esta associação permite simplificar o processo de análise, tornando-o mais rápido. Caso contrário, seria necessário analisar individualmente cada barra.

Depois, definiram-se os graus de liberdade em determinadas barras para permitirem o funcionamento da estrutura (ver figura 35). Estes podem admitir o deslocamento ou a rotação de uma barra em qualquer eixo ou de apenas um nó, permanecendo o outro fixo.

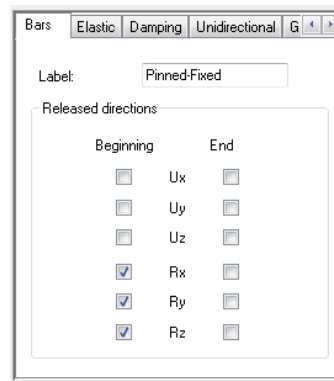


Figura 35 – definição do grau de liberdade de cada barra.

Identificaram-se os suportes da estrutura, para saber onde é descarregada a carga. Na figura 36, observam-se uns quadrados azuis e umas pirâmides azuis que representam os suportes fixos e os móveis. Os suportes móveis têm como função significar as rodas que farão a rotação da estrutura. Ainda nesta figura, vêm-se diversas linhas em forma de xxx, em tom encarnado, que representam os nós que permitem deslocação/rotação.

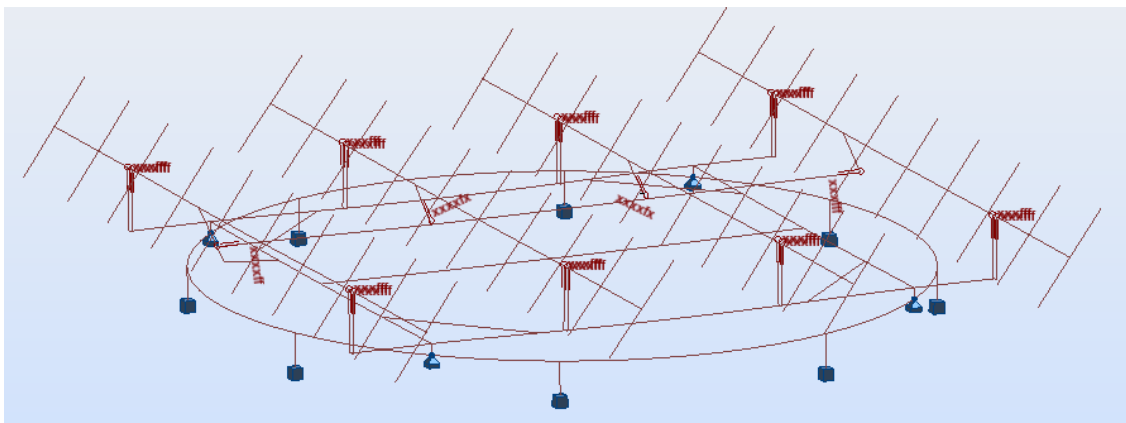


Figura 36 – suportes móveis e fixos da estrutura.

O comportamento/reação de cada barra, ou neste caso, de cada grupo também tem de ser especificado (figura 37).

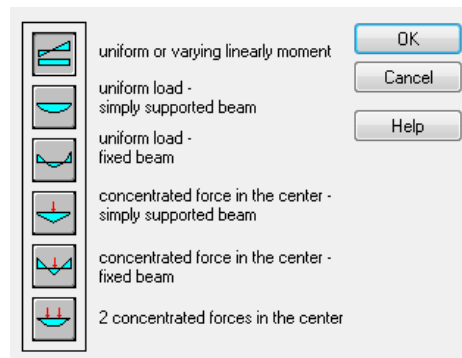


Figura 37 – seleção do comportamento das barras.

Para melhor definição dos fenómenos de encurvadura, define-se para cada grupo os pontos de ligação/travamentos com os respetivos coeficientes de afectação, como se verifica pela figura 38.

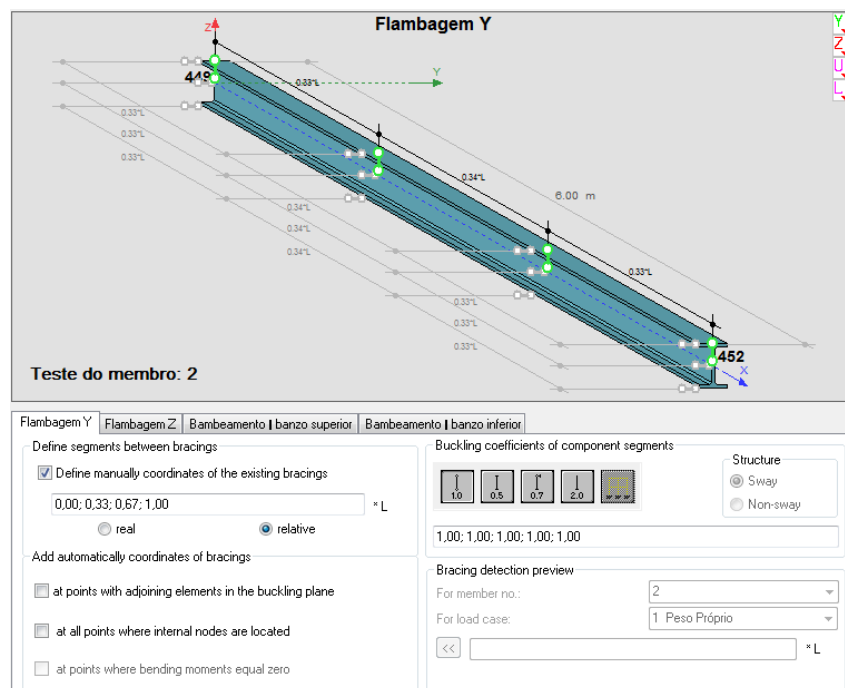


Figura 38 – definição dos travamentos para o fenómeno de encurvadura.

De seguida, introduzem-se as cargas calculadas no decorrer deste trabalho. O que faz com que a estrutura fique sujeita às seguintes ações:

- Peso próprio da estrutura e painéis fotovoltaicos;
- Carga de vento.
- Carga de neve.

As ações não possuem todas, o mesmo peso. Assim, estas serão influenciadas por coeficientes parciais de segurança, dependendo do tipo de ação:

- Ações permanentes;
- Ações variáveis;
- Combinação de ações.

Neste campo, define-se um conjunto de combinações com as diversas hipóteses de conciliação de ações. Isto, porque existe mais de uma carga de vento, não podendo estas, atuar ao mesmo tempo sobre a estrutura. Segundo o Eurocódigo 1 – Parte 1-4, é necessário aplicar estas cargas de vento na estrutura, com a localização do centro de força, a um quarto do tamanho do painel, dependendo do lado em que incide o vento, conforme se observa pela figura 39.

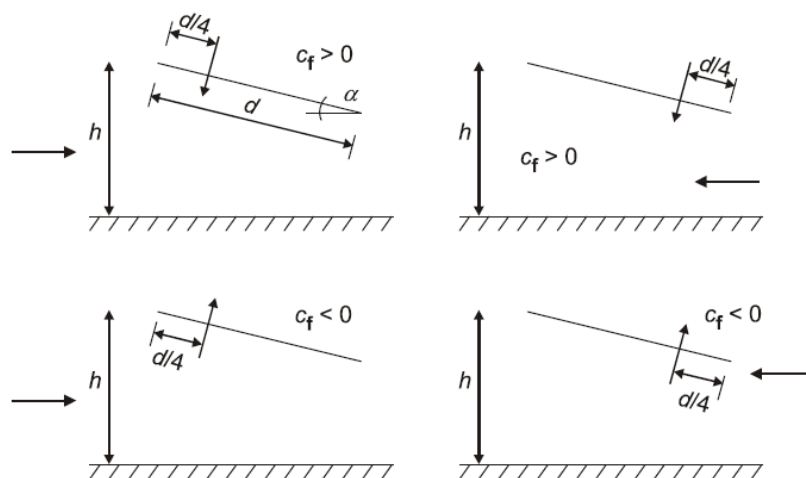


Figura 39 – localização do centro de força para coberturas isoladas de uma vertente.

Deste modo, criaram-se seis diferentes cargas de vento sendo elas e a carga de neve, ações variáveis. O peso da estrutura e dos painéis são ações permanentes. Na figura 40, vê-se na primeira coluna as ações a que a estrutura se encontra sujeita e na seguinte o tipo de carga. A terceira refere-se aos grupos criados enquanto que a sexta às cargas aplicadas na estrutura.

Caso	Tipo de carga	Lista					
1: Peso Próprio	peso próprio	2 19 23 26 2	Toda a estrut	-Z	Coef=1,00	MEMO:	
2: Peso dos painéis	(EF) uniforme de superfíc	168to175 17	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,11	global	projetada
4: Vento SE	(EF) uniforme de superfíc	169 171 173	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,61	local	projetada
5: Vento IE	(EF) uniforme de superfíc	168to174By2	PX=0,0	PY=0,0	PZ=1,52	local	projetada
6: Vento S	(EF) uniforme de superfíc	168to174 17	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,30	local	projetada
7: Vento I	(EF) uniforme de superfíc	168to175 17	PX=0,0	PY=0,0	PZ=0,76	local	projetada
8: Carga da neve	(EF) uniforme de superfíc	168to175 17	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,39	global	projetada
9: Vento SE1	(EF) uniforme de superfíc	168to174By2	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,61	local	projetada
10: Vento IE1	(EF) uniforme de superfíc	169 171 173	PX=0,0	PY=0,0	PZ=1,52	local	projetada

Figura 40 – ações aplicadas no seguidor.

Na fase seguinte, verifica-se se as cargas estão devidamente aplicadas. Para isso, observa-se pela figura 41 se o descarregamento é realizado nas barras que suportam os painéis e não apenas nos painéis. Como se verifica as cargas (a vermelho) estão aplicadas sobre as barras. Esta etapa é importante, porque caso o descarregamento não seja feito nas barras pretendidas, não se adquire as cargas devidas em cada elemento.

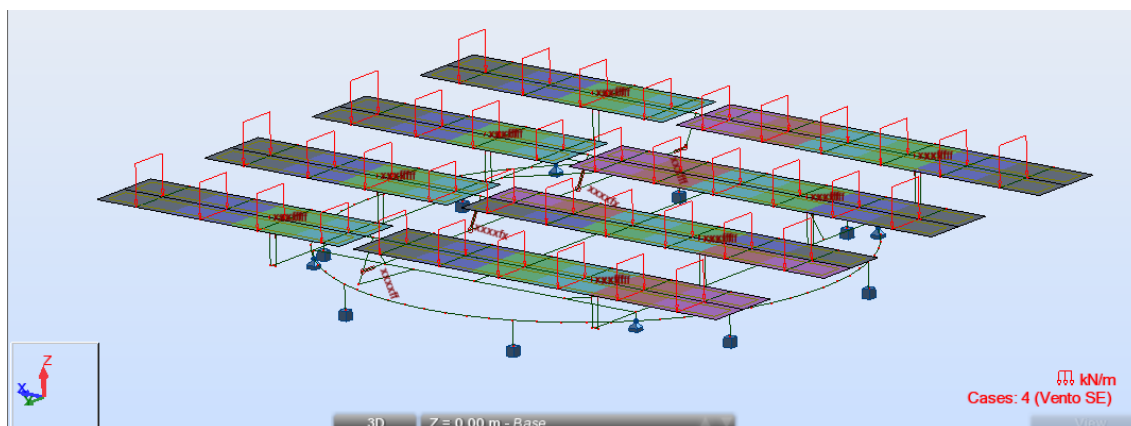


Figura 41 – descarregamento das cargas sobre as longarinas.

O dimensionamento é realizado de modo a otimizar o peso da estrutura. Através do *software* utilizado, varia-se o perfil e a secção do componente, com o objetivo de obter o menor peso possível. O utilizador, após realizar as simulações obtém rácios, que permitem saber o estado da estrutura, ou seja, se está sobredimensionada ou subdimensionada.

Este é um processo iterativo, no qual tenta-se otimizar a estrutura com variações de seções de perfis e ajustamentos de distâncias entre apoios, para conseguir obter diagramas de momentos em equilíbrio e utilizar a menor quantidade de material. A figura 42 é um exemplo de uma simulação, sendo

esta a da estrutura já dimensionada. A primeira coluna refere-se aos grupos de barras criadas, a segunda ao perfil e secção da barra e na terceira o material de cada um dos grupos. Avaliando os valores da coluna “Solicita” da figura, consegue-se saber o estado de cada grupo. O ideal seria este valor estar próximo dos 0,9, que significa que recorre à menor quantidade de material para aguentar com as solicitações aplicadas. Quanto menor for esse valor mais sobredimensionada encontra-se a estrutura. No entanto, alterando apenas um grupo, todos os outros também sofrem mudanças, tornando um processo repetitivo na busca dos melhores valores.

Peça		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicita	Caso
Família : 1 Longarinas							
160 Veios_160	OK	C 50x50x2	S 235	18.95	21.10	0.27	11 ULS /66/
Família : 2 Base G							
58 Barra G_58	OK	BOX1_80_80_3	S 275	49.59	49.59	0.84	11 ULS /31/
Família : 3 Base P							
61 Barra P_61	OK	BOX1_80_80_2	S 275	39.56	39.56	0.64	11 ULS /34/
Família : 4 Veios							
26 Veios_26	OK	BOX1_90_90_3	S 275	36.35	36.35	0.79	11 ULS /34/
Família : 5 Apoios							
354 Apoios_354	OK	UPN 50x38x5	S 275	28.35	48.97	0.77	11 ULS /42/
Família : 6 Reforços							
70 Reforço_70	OK	TUBO_48_3	S 275	88.69	88.69	0.18	11 ULS /33/
Família : 7 Alavancas							
152 Alavancas_152	OK	BOX1_60_60_3	S 275	17.17	17.17	0.60	11 ULS /33/
Família : 8 Braço							
2	OK	BOX1_40_40_3	S 275	134.61	134.61	0.89	11 ULS /66/
Família : 9 Base P C/A							
60 Barra P C/A_60	OK	BOX1_80_80_3	S 275	27.18	27.18	0.76	11 ULS /34/
Família : 10 Alavanca C/A							
319 Alavancas C/A_	OK	BOX1_60_60_3	S 275	17.23	17.23	0.69	11 ULS /65/
Família : 11 Carril							
230 Veios_230	OK	IPE 80	S 275	3.60	11.06	0.70	11 ULS /34/
Família : 12 Barra para cabos							
331 Barra cabo_331	OK	BOX1_60_60_2	S 275	189.93	189.93	0.46	11 ULS /34/

Figura 42 – resultado obtidos após a última simulação.

Este processo repetiu-se dos 0° aos 60°, de 5° em 5°. Foram verificadas todas estas inclinações dos painéis com as respetivas alterações de cargas, para obter a confirmação que a estrutura aguenta com todas as solicitações.

Caso não exista uma lista de perfis já criada no programa, o utilizador vê-se obrigado a recorrer a catálogos, a fim de ver as seções de cada perfil existentes no mercado.

Como o seguidor solar é composto na sua grande maioria por perfis, o Euro-código 3: “Projecto de estruturas”, regido segundo a norma NP EN 1993-1-10 de 2009, estabelece que no dimensionamento de estruturas devem ser utilizados os seguintes aços estruturais:

- S235;
- S275;
- S355.

Neste contexto, qualquer outro material utilizado neste produto não permitia o seu certificado, ou seja, o produto não poderia ser comercializado na União Europeia. Pela figura 42, observa-se que a maioria dos perfis é comercializada com o aço estrutural S275.

No final do dimensionamento, concluiu-se que o seguidor solar consegue sustentar um valor de carga de neve superior ao previsto. Isto acontece, devido ao elevado valor da carga de vento. Este facto permite aumentar a carga de neve, podendo a estrutura ser instalada na zona I do território Nacional. Na figura

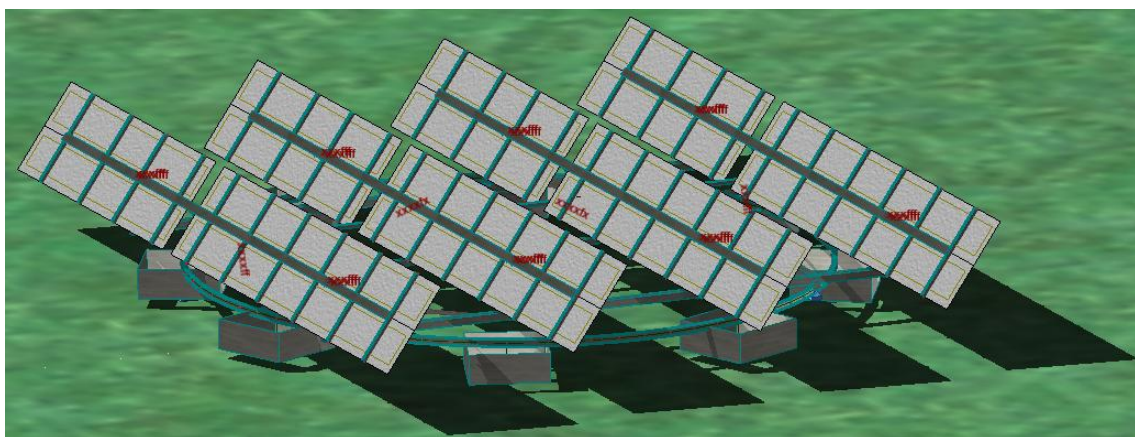


Figura 43 – seguidor solar dimensionado pelo *software*.

Geralmente, neste tipo de produtos, para encontrar a melhor solução, faz-se a relação do peso da estrutura com a potência que pode produzir.

Quanto menor for esse valor, menor é o investimento inicial para a mesma potencia instalada. Isto acontece, porque o grande custo do seguidor, é devido ao custo do material e da mão-de-obra.

Para garantir a qualidade dos materiais durante o seu tempo de vida, estes são submetidos a uma proteção anticorrosiva de galvanização por imersão a quente.

Durante o dimensionamento, verificou-se que as reações dos suportes da estrutura eram negativos. Significando isto, que devido às cargas aplicadas, a estrutura não permanecia no solo. Para a resolução deste problema surgiram duas opções:

- Aumentar o peso da estrutura através do aumento das seções dos perfis, sendo necessária a realização de novos dimensionamentos.
- Inserir na estrutura o peso necessário com a colocação de blocos de betão.

Optou-se pela implementação de blocos de betão, devido ao seu custo relativamente ao aço ser menor. O preço do betão é cerca de um décimo menor do que o preço do aço.

Sendo a pressão dinâmica de pico:

$$q_p(z) = 1519 \text{ Pa}$$

Obtêm-se que são necessários 5115 kg para manter a estrutura no solo. Como a massa da estrutura é:

- Massa da estrutura – 744 kg (descrito pelo software);
- Massa de ligações + galvanização – 112 kg (estima-se que 15% do valor da massa da estrutura);
- Massa dos painéis – 400 kg (20 kg cada painel);
- O que perfaz no total – 1256 kg
- Para garantir a permanência da estrutura no solo são precisos – 3859 kg

Sabendo que 1 m³ de betão tem de massa 2500 kg, para os 3859 kg são necessários 1,6 m³. Dividiu-se em 8 blocos de 0,2 m³ (0,8x0,8x0,3 m) para uma melhor distribuição do peso sobre a placa do edifício.

Outro aspeto importante a salientar, é a dilatação térmica linear que pode suceder com o IPN80 que serve de carril para a rotação da estrutura. Como este é fixo aos blocos de betão, se existir dilatação pode provocar o arrastamento dos blocos causando danos sobre a superfície da placa.

Para calcular-se a variação de comprimento do carril provocado pela dilatação térmica linear, utilizou-se a seguinte equação:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (9)$$

em que:

ΔL — variação de comprimento do corpo;

L_0 — comprimento inicial do corpo;

α — coeficiente de dilatação térmica do aço;

ΔT — variação de temperatura sofrida pelo corpo.

substituindo os valores, resulta:

$$L_0 = 3,02 \text{ m}$$

$$\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta T = 40^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$$

$$\Delta L = 1 \text{ mm}$$

Para apenas uma barra, a variação de comprimento é 1 mm, que no total perfaz 4 mm. Apesar de ser um valor pequeno é necessário criar condições que permitam essa dilatação.

No decorrer da análise aos eurocódigos e dos outros seguidores solares, verificou-se que as cargas obtidas através destes são muito superiores relativamente às normas Espanholas, concretamente a CTE DB SE-AE que faz

uma abordagem simplificada comparativamente ao eurocódigo [28]. Para as mesmas condições de aplicação, temos:

Tabela 9 – comparação dos valores de cargas obtidos com diferentes normas.

	VIM em Portugal	VIM em Espanha
Carga de vento	1,52	0,95
Carga de neve	0,49	0,3

Esta diferença de cargas faz com que, utilizando a CTE DB SE-AE, as cargas aplicar no seguidor sejam inferiores às obtidas pelo cálculo pelos Eurocódigos. Significando isto, que a estrutura não necessita de ser tão reforçada.

3.4 Cálculo de ligações

O cálculo de ligações permite complementar o dimensionamento da estrutura. De modo a facilitar e acelerar este processo, utilizou-se folhas de cálculo do *Excel*. Após estes cálculos, torna-se possível realizar a modelação 3d da estrutura.

3.4.1 Ligações com cavilhas

Na estrutura existem diversas zonas onde há a existência de cavilhas que não são amovíveis. Estas estão presentes na ligação da parte superior (formada pelos painéis, longarinas e veio) aos pilares, e permitem a rotação da primeira. Apesar de existirem oito ligações, o cálculo apenas será realizado para uma. Isto, porque são todas idênticas. O material da cavilha é o aço Ck45. Para uma cavilha que suporta carga axial de 20 kN, têm-se que:

A resistência ao corte da cavilha é dada pela expressão:

$$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} / \gamma_{M2} \geq F_{v,Ed} \quad (10)$$

em que:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 7^2 = 153,9 \text{ mm}^2 \quad \text{Considerando o diâmetro 14 mm}$$

$$f_{up} = 570 \text{ MPa} \quad \text{Tensão de rotura à tração da cavilha}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Coeficiente parcial de segurança

resultando:

$$F_{v,Rd} = 42 \text{ kN} \geq 20 \text{ kN}$$

Enquanto a resistência à flexão é dada por:

$$M_{Rd} = 1,5 W_{el} f_{yp} / \gamma_{M0} \geq M_{Ed} \quad (11)$$

onde:

$$f_{yp} = 330 \text{ MPa}$$

Tensão de cedência

$$\gamma_{M0} = 1,25$$

Coeficiente parcial de segurança

$$W_{el} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = 170$$

Módulo da flexão elástica

$$M_{Ed} = 100 \text{ MPa}$$

assim:

$$M_{Rd} = 133 \text{ MPa} \geq M_{Ed} = 100 \text{ MPa}$$

Sendo a resistência da cavilha a uma combinação de esforço de corte com flexão:

$$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1 \quad (12)$$

substituindo resulta:

$$0,62 \leq 1$$

Para a carga aplicada, uma cavilha com diâmetro de 14 mm é suficiente. Através de uma folha de cálculo do *Excel*, realizou-se o processo de cálculo, onde se insere todos os dados e variando o diâmetro da cavilha obtêm-se o resultado.

Cálculo de cavilhas

Carga axial	20000	N		
Diâmetro	14	mm		
L	50	mm		
Tensão cedência	330	MPa		
F _{up}	570			
W _{el}	269,392			
g	0,1	distância a que a força se encontra do veio		
Momento	100000	M,rd	133349	OK

Resistência ao corte da cavilha		$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} / \gamma_{M2} \geq F_{v,Ed}$		
	F _{v,Ed}		F _{v,Rd}	
	20000	N	42117,448	N OK
Área	153,9	N		

Resistência da cavilha a uma combinação de esforço de corte com flexão		$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1$		
			0,61874	OK

Figura 44 – cálculo de cavilhas com recurso a folhas de cálculo.

3.4.2 Elementos ligados por cavilhas

Estes elementos, representados na figura 45 permitem ligar as cavilhas à parte superior (formada pelos painéis, longarinas e veio) permitindo a sua rotação. O material utilizado na sua construção é o aço S275. Existem duas formas de calcular a espessura e dimensões deste elemento (Anexo B). Contudo utilizou-se a equação 13:

$$t \geq 0,7 \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{f_y}} \quad (13)$$

em que:

$$f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M0} = 1,25$$

$$F_{Ed} = 20 \text{ kN}$$

De onde obtêm-se uma espessura de 6 mm. Sendo precisa a confirmação que:

$$d_0 \leq 2,5t$$

O que se confirma, uma vez que:

$$14 \leq 15$$

Para calcular as dimensões do elemento, recorre-se à figura 46.

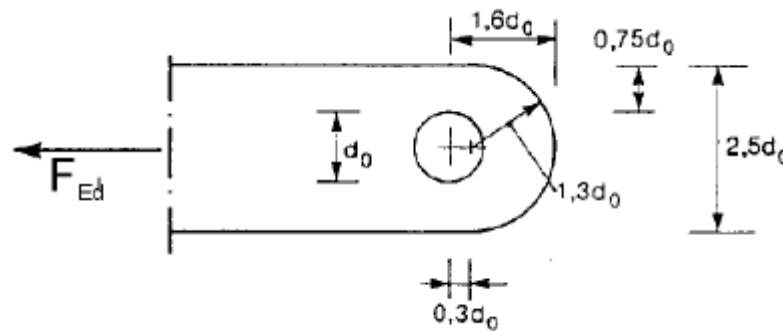


Figura 45 – geometria do elemento de ligação à cavilha.

Multiplicando o valor do furo (14 mm) pelos valores da figura anterior e obtêm-se as dimensões do elemento, que podem ser consultadas na tabela 10.

Tabela 10 – dimensões do elemento de ligação à cavilha.

1,6 d ₀	22,4 mm
0,75 d ₀	10,5 mm
2,5 d ₀	35 mm
1,3 d ₀	18,2 mm
0,3 d ₀	4,2 mm

3.4.3 Ligações aparafusadas

As ligações aparafusadas fazem a conexão entre os componentes que se pretende manter fixos. A maioria das ligações é igual uma vez que a estrutura é simétrica. Vários componentes são semelhantes e por isso foram calculados para a situação que exige mais esforços, de modo a facilitar o processo de fabrico.

As longarinas são perfis em C que suportam o peso dos painéis e estão ligadas a uma barra por dois parafusos distanciados entre si 40 mm. Esta ligação encontra-se à tração. Chegou-se aos valores da tabela 11, através dos dados retirados do *software* utilizado no dimensionamento da estrutura.

Tabela 11 – esforços nas longarinas.

F_x [kN]	F_y [kN]	M_z [kN.m]
0,22	1,1	0,3

Assim sabe-se que o parafuso está sujeito a uma força de:

$$F_{t,Ed} = \left(\frac{F_y}{2}\right) + \left(\frac{F_x}{2}\right) + \left(\frac{M_z}{2}\right) = \frac{1,1}{2} + \frac{0,22}{2} + \frac{0,3}{2} = 1,6 \text{ kN}$$

Esta ligação está sujeita a um esforço pequeno, podendo utilizar-se um parafuso M8. Para obter o valor de resistência à tração deste, utiliza-se a seguinte equação:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (14)$$

onde:

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa} \quad \text{Consultar anexo B}$$

$$A_s = 36,6 \text{ mm}^2 \quad \text{Consultar anexo B}$$

$$k_2 = 0,9$$

Resultando:

$$F_{t,Rd} = 21 \text{ kN}$$

Para esta ligação será utilizado um parafuso – M8 classe 8.8.

Os braços permitem transmitir o movimento basculante dos painéis através de uma barra accionado pelo actuador linear e estão sujeitos aos esforços observados na tabela 12, obtidos também pelo *software* utilizado no dimensionamento:

Tabela 12 – esforços no braço.

F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_y [kN.m]	M_z [kN.m]
16	1,2	4	2,8	0,6
Tração	Corte	Corte	Tração	Tração

Cálculo do esforço de tracção atuante no parafuso:

$$F_{t,Ed} = \frac{16}{4} + \frac{\left(\frac{2,8}{0,045}\right)}{2} + \frac{\left(\frac{0,6}{0,12}\right)}{2} = 37 \text{ kN}$$

Cálculo do esforço de corte atuante no parafuso:

$$F_{v,Ed} = \sqrt{\left(\frac{4}{4}\right)^2 + \left(\frac{1,2}{4}\right)^2} = 1,04 \text{ kN}$$

Para calcular o esforço de tracção resistente de um parafuso M12 classe 8.8, utiliza-se a equação 14, em que:

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

$$A_s = 84,3 \text{ mm}^2$$

$$k_2 = 0,9$$

Resultando em:

$$F_{t,Rd} = 41,64 \text{ kN}$$

Agora, para calcular o esforço de corte resistente de um parafuso M12 classe 8.8, utiliza-se a seguinte equação:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (15)$$

onde:

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

$$A = 113,1 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_v = 0,6$$

Resultando um esforço de corte resistente de:

$$F_{v,Rd} = 32,37 \text{ kN}$$

Assim, fica apenas a faltar a confirmação da combinação de corte com tração, que pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (16)$$

Substituindo os valores resulta:

$$\frac{1,04}{32,37} + \frac{37}{1,4 \times 41,64} \leq 1,0$$

$$0,67 \leq 1,0$$

Pelo resultado, confirma-se que nesta ligação podem ser utilizados parafusos M12 classe 8.8. No entanto, falta ainda determinar a espessura e dimensões da chapa de ligação. Para determinar as dimensões recorre-se às variáveis da figura 46.

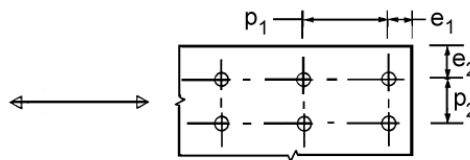


Figura 46 – distâncias requeridas na chapa de ligação.

O valor dessas variáveis tem de ser superior ao valor do diâmetro influenciado pelos valores descritos na tabela 13 e assim obtêm-se as dimensões mínimas para a placa de ligação.

Tabela 13 – distâncias mínimas requeridas na construção da chapa de ligação.

Distâncias Mínimas			
$e_1 = 1.2d_0$	$p_1 = 2.2d_0$	$e_2 = 1.2d_0$	$p_2 = 2.4d_0$
20,4mm	37,4mm	20,4mm	40,8mm

Para fazer a verificação ao esmagamento, utiliza-se a seguinte equação:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (17)$$

Contudo o cálculo foi efetuado numa folha de cálculo do Excel (figura 47), na qual se introduz a espessura da chapa de ligação e obtêm-se a resistência ao esmagamento do parafuso que terá de cumprir estes requisitos:

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

CHAPA DE LIGAÇÃO		f_u	f_y	Classe	γ_{Mo}
Classe	S275	430MPa	275MPa	4,8	1,0

Espessura (t)	2,0mm
---------------	-------

Parafusos Internos	$F_{b,Rd} = -14,04kN$
Parafusos de Bordo	$F_{b,Rd} = 11,11kN$

k_1	α_b
-1,7	1,000
2,5	0,538

α_d	f_{ub}/f_u
2,571	1,86
0,538	1,86

Figura 47 – cálculo da resistência ao esmagamento do parafuso.

Pelos cálculos, a chapa de ligação precisa de uma espessura de 2 mm para resistir ao esmagamento do parafuso, uma vez que o esforço ao corte é baixo.

$$F_{v,Ed} = 1,04 \text{ kN}$$

No anexo B, é possível encontrar todas as informações para a obtenção dos valores encontrados na figura 47.

3.5 Dimensionamento pelo método de elementos finitos

Utilizam-se os elementos finitos para a verificação e confirmação de alguns componentes. Para realizar a simulação é necessário seguir os seguintes passos:

- Atribuir o material;
- Definir restrições;
- Atribuir cargas;
- Calcular a malha.

Para este processo, utilizou-se o *software Autodesk Inventor*. Apenas se fez a verificação em componentes simples, porque torna-se complicada a análise em conjuntos, a nível de *hardware*.

Um dos componentes analisados pelos elementos finitos foram os elementos de ligação a cavilhas, vulgarmente conhecidos por “orelhas”, em conjunto com as chapas de ligação (ver figura 48). Nesta simulação, observa-se que o valor máximo de tensão obtida é um pouco elevado, em relação à tensão de cedência do material utilizado (S275). No entanto apenas se situa num pequeno ponto, podendo traduzir um ponto de concentrações de tensões.

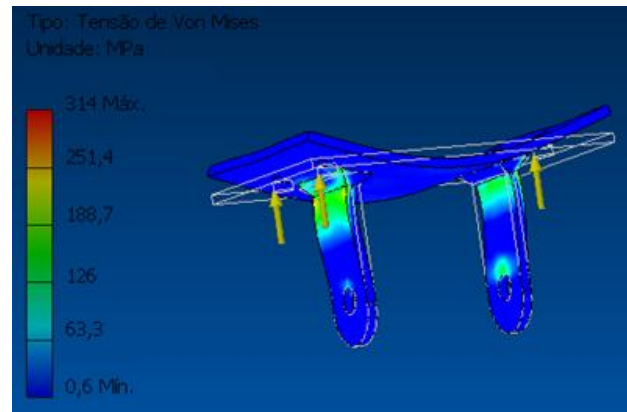


Figura 48 – resultado da simulação de uma chapa de ligação com orelhas.

O componente que tem por objetivo garantir a permanência da estrutura junto ao solo, ou seja, não permitir o levantamento da estrutura também foi analisado, como se observa na figura 49. Contudo neste caso, os valores encontram-se todos dentro dos limites admissíveis, portanto abaixo do valor de tensão de cedência do material S275.

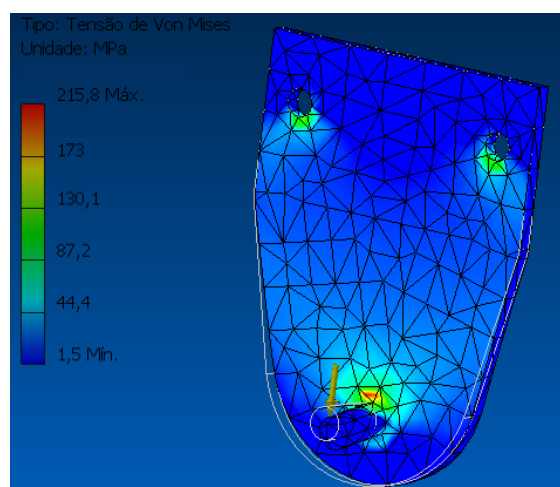


Figura 49 - resultado da simulação de um componente para não permitir o levantamento da estrutura.

Após a simulação, concluiu-se que o braço de transmissão de movimento aos painéis demonstrado pela figura 50 necessita de uma chapa de ligação superior à calculada anteriormente. Mesmo assim, apresenta pequenos pontos nos furos, resultante de concentração de tensões, que excede a tensão limite de cedência, ou seja os 275 MPa. Contudo não se afigura um problema para o conjunto, porque este tirando esses pontos nos furos, não ultrapassa a tensão de cedência do material.

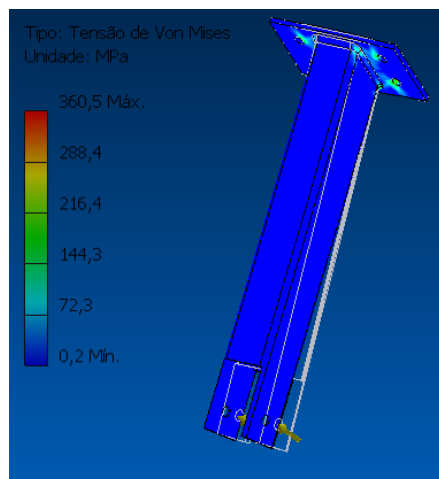


Figura 50 - resultado da simulação do braço de transmissão de movimento.

3.6 Selecção de componentes

A selecção de componentes neste trabalho teve um contexto industrial, por assim dizer, que foi diferente do praticado usualmente. Isto, porque neste caso os fornecedores ficam a cargo, através dos dados fornecidos, de procurar a melhor solução, sem que a empresa necessite de perder tempo nessa pesquisa.

No caso do motor para o acionamento das rodas, num caso ideal, seriam necessárias pelo menos 3 motores para garantir o correto funcionamento. No entanto, uma vez que a política da empresa baseia-se em lançar o produto pelo menor preço possível no mercado e atendendo que a concorrência só possui um, a opção será a mesma.

A estrutura irá mover-se 4º a cada 16 min, para fazer o acompanhamento do sol. Significando que terá deslocações curtas, de cerca de 22 cm, obrigando assim à utilização de um motor com caixa redutora de modo obter velocidades muito baixas. O motor tem de ser monofásico, uma vez que as instalações domésticas não têm corrente trifásica.

Dados retirados pelo fornecedor:

- Velocidade de rotação das rodas – 5 RPM
- Massa da estrutura – 2500 kg
- Diâmetro das rodas – 125 mm
- Diâmetro do carril – 6,2 m
- Tipo de corrente – monofásica

Com estes dados, forneceram o motor com o redutor R47R37AM80, tendo as seguintes características:

- Relação de transmissão – 1630
- Potência do motor – 350W
- Rotação motor – 1650 Rpm
- Alimentação 24Vdc(baterias)

Apesar dos fornecedores realizarem os cálculos através dos dados fornecidos, também fez-se um cálculo para ter uma base comparativa, do qual se obteve um valor de 630W. Uma vez que o motor fornecido tem um preço mais reduzido, devido à sua menor potência, não se fará qualquer correção do produto, já que o fornecedor responsabiliza-se por qualquer incoerência que haja com o pretendido, ou seja, caso a solução fornecida não seja compatível com a solução, o fornecedor troca o produto por uma nova solução, sem custos adicionais.

Quanto ao atuador linear, verificou-se as cargas às quais estava sujeito no *software* usado no dimensionamento. Para obter curso deste equipamento, recorreu-se à modelação 3d, para saber concretamente o comprimento da haste. Dados retirados pelo fornecedor:

Carga estática máxima – 25 kN

Carga dinâmica máxima – 6 kN

Curso máximo – 1 m

Neste caso, o produto poderia ser escolhido diretamente do catálogo, mas dado que o curso do seguidor influencia bastante o preço, os fornecedores conseguem obter a melhor relação dentro da gama que produtos que têm. Destes dados, resultou o modelo HT25 da *MecVel*.

Capítulo 4

4.1 Projeto para o fabrico

O projeto para o fabrico pretende ilustrar os passos necessários para a produção, montagem e manutenção do seguidor solar.

4.2 Descrição do produto

O seguidor solar é constituído por perfis quadrangulares, em C, em U e está dimensionado segundo os Eurocódigos. O acionamento do movimento basculante dos painéis realiza-se através de um atuador linear, enquanto o movimento de rotação da estrutura faz-se a partir de um motor elétrico monofásico. Qualquer parâmetro de funcionamento pode ser configurado a partir de um quadro eléctrico instalado na estrutura.

O produto apresenta as seguintes características:

- Potência mínima – 3,3 kW;
- Potência máxima – 5,4 kW;
- Dimensões – 8,4x6,4 m;
- Altura máxima – 1,65 m;
- Área de exposição solar – 33 m²;
- Massa – 900 kg em aço + 3859 em betão;
- Velocidade de funcionamento – 60 km/h;
- Velocidade de rajada – 120 km/h

4.3 Modelação 3D

A modelação 3d é fundamental para definir todos os componentes constituintes da estrutura. Aqui, simula-se o funcionamento do seguidor solar para verificar eventuais interferências entre os vários componentes. Na figura 51, observa-se o seguidor totalmente construído.

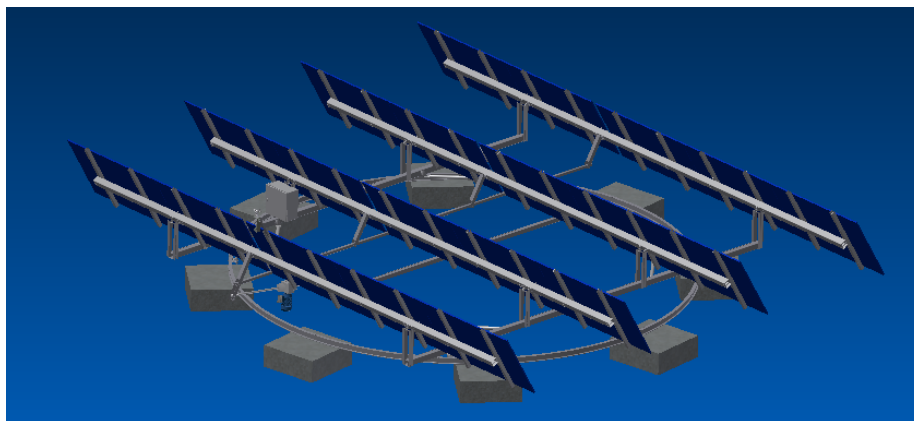


Figura 51 – seguidor solar.

Na figura 52, é possível ver o actuador linear ligado a um braço, no qual existe uma barra que transmite o movimento aos restantes braços, que por sua vez fazem o conjunto veio, longarina e painéis mover-se.

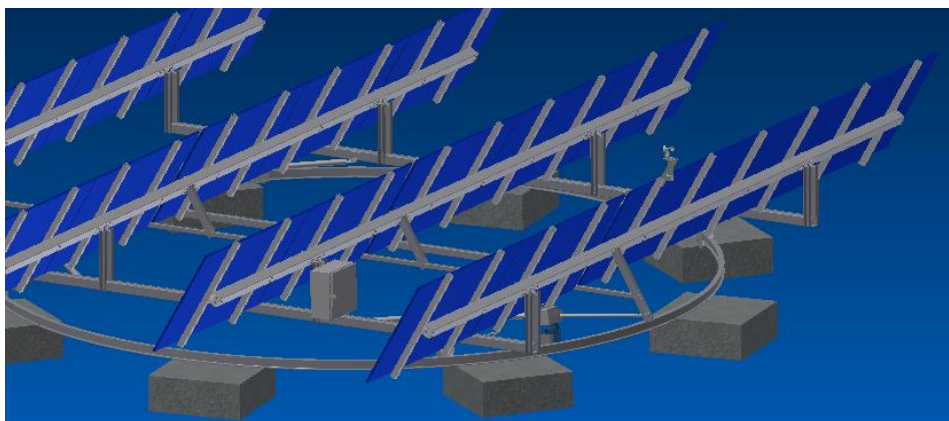


Figura 52 – modelação 3d completa do seguidor solar.

Esta modelação permite acertar pequenos pormenores, como a posição de instalação de fins de curso para a deteção dos movimentos, e ainda do quadro eléctrico, motores e anemómetros.

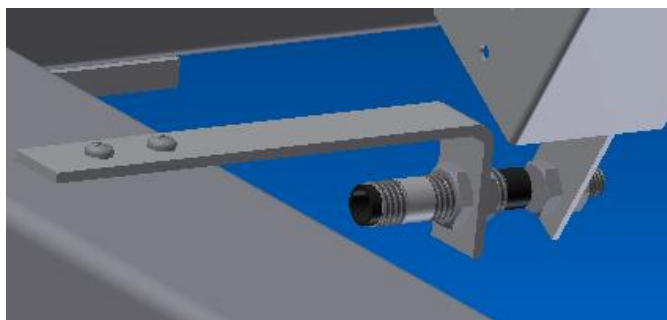


Figura 53 - fins de curso.

Também para a elaboração de pequenos conjuntos, esta modelação é benéfica. A figura 54 mostra o sistema de rodas utilizado no seguidor. A roda é revestida por uma carcaça que permite a ligação a outros componentes, inclusive para a acoplação do motor. Apenas uma das quatro rodas terá o motor acoplado. O componente com a cor laranja permite fazer o guiamento da estrutura, enquanto o cinzento serve para prevenir o levantamento do seguidor.

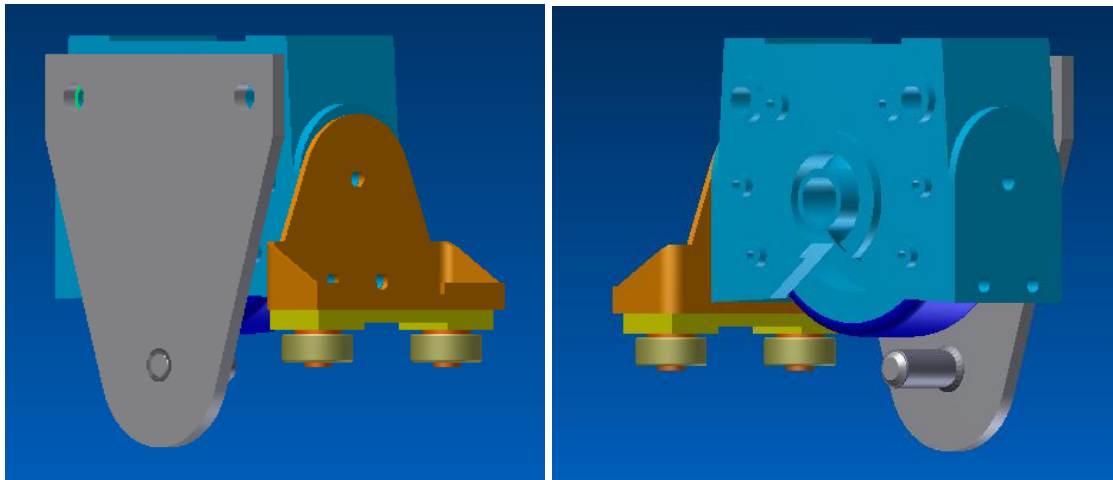


Figura 54 – Conjunto de guiamento da estrutura.

4.4 Desenhos técnicos

Para que os componentes dimensionados possam ser produzidos, é preciso fornecer a documentação aos operadores, com dimensões e tolerâncias que se pretende.

Os desenhos técnicos do seguidor solar, permitem que qualquer fabricante consiga produzir o seguidor solar e que no final o produto seja igual em todos eles. Neste caso, a produção é realizada a nível interno, no entanto todas as cotas e tolerâncias exigidas devem estar explícitas no desenho de cada componente.

Normalmente faz-se a divisão dos desenhos técnicos em três categorias:

- Desenhos técnicos de componentes individuais;
- Desenhos técnicos de construções soldadas;

- Desenhos técnicos de conjuntos.

Nos desenhos técnicos individuais, faz-se a cotação de cada componente da estrutura.

Nos desenhos de construções soldadas, descreve-se em que locais de um componente devem ser soldados outros componentes, à imagem de um desenho de conjunto. Contudo, como esta ainda é uma etapa de fabrico, é conveniente fazer a distinção.

Os desenhos de conjuntos permitem ajudar na montagem do equipamento. Nestes faz-se a ligação entre todos os componentes.

A partir desta modelação consegue-se obter concretamente as dimensões de todos os componentes, podendo proceder-se à listagem de material. Os desenhos técnicos podem ser consultados no Anexo D.

4.5 Processo de fabrico

No processo de fabrico existe um conjunto de procedimentos e instruções que permitam a produção e compra de todos os elementos necessários à construção do seguidor solar.

4.5.1 Listagem de material

Antes da produção dos componentes, é necessário fazer uma lista de encomenda com os perfis/materiais pretendidos. Esta lista, obrigada a calcular a quantidade de material, de cada tipo de perfil/seção que será utilizado, tendo sempre em atenção os comprimentos existentes nos catálogos do fornecedor.

Esta etapa requer alguma atenção, para evitar desperdício material. Por isso convém otimizar os comprimentos das barras em bruto.

Tabela 13 – listagem de materiais.

Quantidade/ unidade	Perfil	Material	Comprimento [m]
2	□80x80x3	S275	6
1	□80x80x3	S275	12
4	UPN 50	S275	8
4	C50x50x14x2	S235	10
1	IPN 80	S275	12
4	□90x90x3	S275	8
1	□60x60x3	S275	6
1	□40x40x3	S275	6

Os materiais descritos na tabela 13 necessitam de sofrer algumas operações, para obter os elementos pretendidos. Mas também é preciso elaborar uma lista de compras de todos os componentes que a empresa não consegue produzir e são essenciais para a construção do seguidor.

Tabela 14 – lista de compras de equipamentos/componentes.

Quantidade	Marca	Produto		Preço unitário
1	Mecvel	HT25		880 €
1	SEW	R47R37AM80 + Motor DC		1106 €
4	Demag	DRS-125		320 €
24	Tecofix	Spit Fix II		2,20 €
24	Igus	GFM-1012-04		0,14 €
52	Igus	GFM-1416-06		0,18 €
80		Fixador de painéis		0,22 €

4.5.2 Sequência de fabrico e equipamentos

Na sequência de fabrico, os materiais passam por diversas etapas. Os perfis, numa primeira fase são cortados através de um serrote, passando depois para a furação. Daí alguns elementos estão prontos para a expedição, enquanto outros necessitam da operação de soldadura. Na tabela 15, pode-se consultar todos os processos que sofrerá cada componente.

Tabela 15 – lista de operações para cada componente.

Componente	Componente codificado	Operação				
		Corte	Furação	Soldadura	Quinagem	Calandrar
Barra Grd Inf.	SS2.BGI.23		X	X		
Barra Pqn Inf.	SS2.BPI.123	X	X	X		
Barra Atuador	SS2.BPA.123	X	X	X		
Barra Cabo	SS2.BCI.12	X	X			
Barra Sup.	SS2.BSL.2		X			
Barra braço	SS2.BBR.123	X	X	X		
Barra ligação	SS2.BLG.2		X			
Pilar	SS2.PLR.12	X	X			
Longarinas	SS2.LGN.1	X	X			
Carril - IPN80	SS2.CRL.125	X	X			X

Existindo a codificação dos elementos que constituem o seguidor, permite aos trabalhadores ao analisar o desenho técnico, saberem quais as operações que a peça necessita.

4.6 Plano de montagem

O plano de montagem serve para o montador da empresa saber quais os procedimentos que seguir para montar o seguidor solar. Deste modo, precisam de um guia que explique passo a passo como realizar a montagem.

Primeiramente sinaliza-se o centro da estrutura para depois, com recurso a uma corda, traçar uma circunferência e marcar os locais onde serão colocados os blocos de betão.

De seguida deve-se colocar os oitos blocos de betão nas marcas e posicionar os elementos que servem de carril de forma a obter um círculo

(figura 55). Com recurso a um nível, deve-se observar, se o carril está nivelado. Caso contrário, colocam-se umas placas até que isso aconteça.

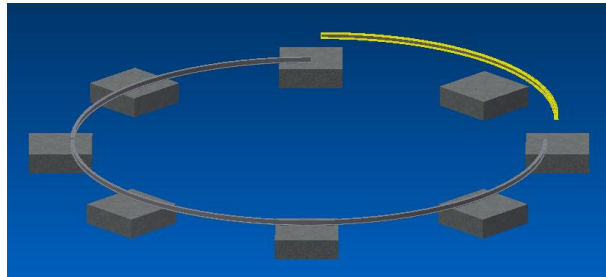


Figura 55 – colocação do carril nos blocos de betão.

Pelas furações do carril, faz-se a furação nos blocos de betão, inserindo depois as buchas metálicas para fixar o carril.

Colocam-se as rodas sobre o carril e cria-se a base retangular. De seguida aparafusa-se a base às rodas e liga-se a barra central, destinada à passagem de cabos (figura 56).

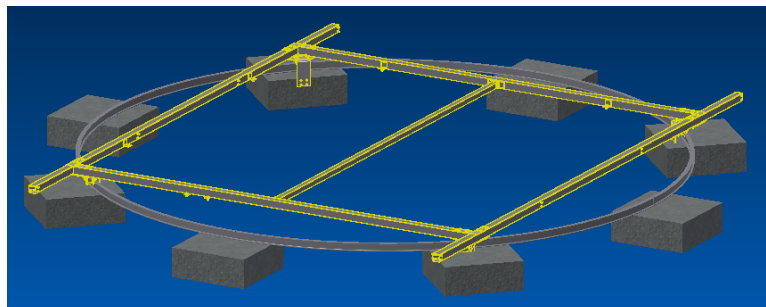


Figura 56 – colocação da base rectangular sobre o carril.

Colocar os pilares e os tubos de atravancamento, ligando-os através dos parafusos (figura 57).



Figura 57 – colocação de pilares e tubos de atravancamento.

De seguida, liga-se as longarinas, as placas com elementos de ligação a cavilhas e os braços de transmissão de movimento, à barra que suporta os painéis, como demonstra a figura 58.

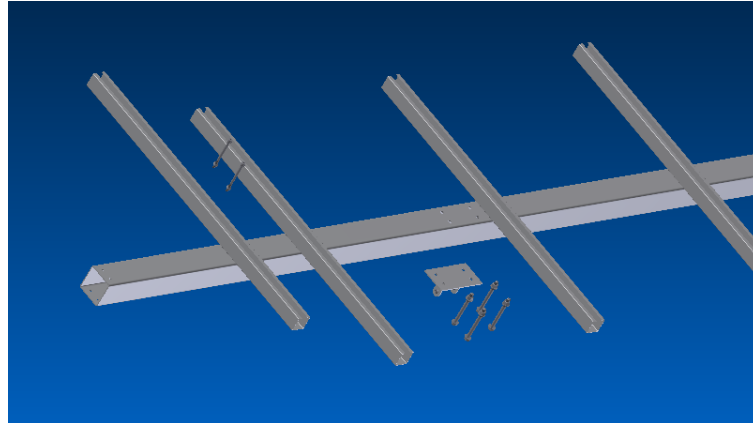


Figura 58 – ligação das longarinas.

Na última fase, através de cavilhas liga-se os conjuntos anteriormente montados. Depois segue-se a montagem da instalação elétrica.

4.7 Plano de manutenção

O plano de manutenção é importante para garantir a longevidade da estrutura e manter o bom funcionamento do sistema. Torna-se fundamental, fazer verificações periódicas e registos das mesmas, para prevenir eventuais problemas. É recomendável uma inspeção a cada seis meses ou anual para averiguar terminais e apertos. No anexo E é possível consultar uma ficha de registo. Neste caso, dividiu-se as verificações em 4 grupos, sendo estas:

- Verificações estruturais;
- Verificações de funcionamento;
- Verificações de programação;
- Verificações elétricas.

As verificações estruturais prendem-se com o estado de conservação da estrutura e dos painéis. Na estrutura deve-se observar se existem pontos de corrosão, elementos desgastados e se os elementos de contato estão lubrificados. Deve-se ver o estado das ligações, ou seja, se estas estão

devidamente apertadas. Os painéis solares requerem manutenção mínima. Para remover a poeira ou depósito de sólidos acumulado deve-se limpar somente com água e uma esponja não abrasiva ou pano.

A rotação e o movimento basculante da estrutura em sintonia com os fins de curso, contemplam as verificações de funcionamento.

As alterações do horário solar, a leitura e funcionamento do anemómetro são verificações de programação

As verificações elétricas baseiam-se na verificação da disposição dos cabos, na sua liberdade de movimento e se estes não apresentam danos.

Capítulo 5

5.1 Análise crítica e conclusões

Neste trabalho em concreto, o dimensionamento da estrutura é um ponto fulcral. Só através de um processo iterativo é possível obter a versão mais otimizada de um produto. Provavelmente, o tempo de projecto será maior mas no final, certamente que teremos um produto reduzido ao limite que permitirá a entrada nos mercados a preços extremamente convidativos.

O facto de existirem outras normas, como a Espanhola divulgada durante este trabalho, que apresentam cargas bastantes inferiores às definidas pelos Eurocódigos, faz com que os produtos concorrentes fiquem em vantagem. Os fabricantes que a utilizam, conseguem ter uma margem de manobra mais alargada para obter um menor custo final e um produto mais competitivo. Contudo, depois de muito trabalho no dimensionamento conseguiu-se obter uma estrutura mais leve que as concorrentes, logo com o preço de fabrico mais reduzido. A utilização dos blocos, devido às cargas mais elevadas usadas no dimensionamento, condiciona a instalação da estrutura e pode ser um factor menos atractivo no seguidor.

A traçagem de um produto tem que ser levada com muito rigor, qualquer deslize pode inviabilizar lotes de componentes já produzidos, o que leva a enormes prejuízos por pequenos erros num desenho técnico.

Aquando a realização de um projecto desta dimensão, é necessário existir uma boa estrutura organizacional da empresa, juntamente com um conjunto de meios e recursos que permitam o seu desenvolvimento e fabrico. Apenas através da interacção dos vários departamentos é possível analisar a viabilidade do mesmo, assim como o investimento e recursos necessários para a sua inicialização.

A nível pessoal, este projeto serviu para adquirir novas noções de trabalho. Não só pelo contato com profissionais experientes mas como pelas metodologias e políticas de trabalho apresentadas pela empresa, que serviram para compreender como se processa e organiza uma indústria.

O desafio de abraçar um trabalho destes, obrigou a um esforço complementar para assimilar novos conhecimentos sobre *softwares* de dimensionamento, até então, nunca utilizados. Foi necessário estudar e compreender diversos novos conceitos durante o dimensionamento e cálculos realizados.

Bibliografia

- [1] “Metalovalga,” Junho 2012. [Online]. Available: <http://www.metalovalga.pt/>.
- [2] “Air Cargo,” Junho 2012. [Online]. Available: www.aircargoworld.com/Air-Cargo-News/2011/10/surcharges-fair-or-foul/312888.
- [3] “OPEC,” Junho 2012. [Online]. Available: www.opec.org/opec_web/en/publications/337.htm.
- [4] “Consumer energy report,” Setembro 2012. [Online]. Available: <http://www.consumerenergyreport.com/2012/06/25/how-much-oil-does-the-world-produce/>.
- [5] REN21, “Renewables 2012 - Global Status Report,” 2012.
- [6] “DGEG,” Junho 2012. [Online]. Available: www.dgeg.pt.
- [7] A. Brasil. [Online]. Available: http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/energia_que_ve_m_do_sol.html. [Acedido em 2012].
- [8] C. Monteiro, “Apontamentos de Energia Eólica e Solar,” FEUP.
- [9] “Meteonorm,” Agosto 2012. [Online]. Available: <http://www.solarfeedintariff.net/worldmap.html>.
- [10] C. Monteiro, “Protecções nos sistemas PV,” O electricista.
- [11] “Solar Project,” [Online]. Available: http://www.ispgaya.pt/eventos/2semana_eng/Fotovoltaiico_Eng_%20Serrano.pdf. [Acedido em Setembro 2012].
- [12] FEUP. [Online]. Available: http://paginas.fe.up.pt/~ee97234/efeito_fotovoltaiico1.htm. [Acedido em Setembro 2012].
- [13] “Principais tipos de células fotovoltaicas,” Australian CRC for Renewable Energy Ltd.
- [14] M. F. B. M. YUNUS, “DESIGN AND DEVELOPMENT OF SOLAR TRACKING,” 2010.
- [15] “SEMI,” 2012. [Online]. Available: www.semi.org/en/node/38346?id=sgurow0811z.
- [16] “Enerwise,” Agosto 2012. [Online]. Available: www.enerwise.pt/imagens.php?id=images/rub_17.

- [17] “Solarwater,” 2012. [Online]. Available: www.solarwaters.pt.
- [18] A. Joyce, “O solar fotovoltaico de concentração,” *Renováveis magazine*, 2010.
- [19] “GreenSavers,” 2012. [Online]. Available: greensavers.sapo.pt/2012/03/21/espanha-uma-central-solar-que-funciona-de-noite/.
- [20] “Missouri - Wind and Solar,” 2012. [Online]. Available: www.mwands.com/index.
- [21] “Solar Choice,” [Online]. Available: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>. [Acedido em Setembro 2012].
- [22] “Mecasolar,” Setembro 2012. [Online]. Available: http://www.mecasolar.com/_bin/seguidor_1_eje.php.
- [23] “Mecasolar,” [Online]. Available: www.mecasolar.com/pub/doc/File/port/triptico_mecasolar_2ejes. [Acedido em 2012].
- [24] “Guia para a certificação de uma unidade de microprodução,” *Renováveis na hora*.
- [25] “EDP,” Agosto 2012. [Online]. Available: www.microgeracaoedp.com/produza-energia-e-ganhe-dinheiro.
- [26] *Renewable Energy World Magazine*, 2011.
- [27] C. N. Rodrigues, “O aproveitamento fotovoltaico da energia solar,” *INETI*, 2008.
- [28] “Apta - Norma Espanhola,” [Online]. Available: www.apta.com.es/pdf/Normativa/CTE/DB_SE_AE.pdf. [Acedido em Outubro 2012].

Anexos

Anexo A

- Quadros de apoio ao cálculo da carga de vento.

Anexo B

- Quadros de apoio ao cálculo de ligações

Anexo C

- Dimensões do motor e redutor

Anexo D

- Desenhos técnicos

Anexo E

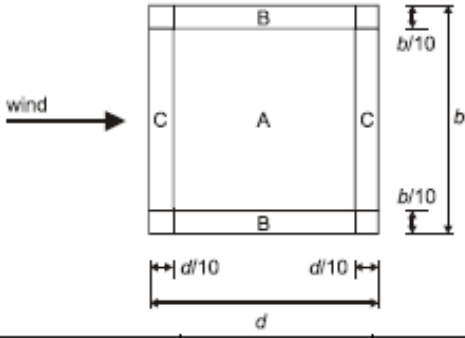
- Ficha de manutenção

Anexo A

Quadro 1 – categorias e parâmetros de terreno.

<i>Categoria de terreno</i>	z_0 [m]	z_{\min} [m]
<i>0 Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar</i>	<i>0,003</i>	<i>1</i>
<i>I Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos</i>	<i>0,01</i>	<i>1</i>
<i>II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura</i>	<i>0,05</i>	<i>2</i>
<i>III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)</i>	<i>0,3</i>	<i>5</i>
<i>IV Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m</i>	<i>1,0</i>	<i>10</i>
<i>NOTA: As categorias de terreno estão ilustradas em A.1.</i>		

Quadro 2 – valores dos coeficientes para coberturas isoladas de uma vertente.

			Coeficientes de pressão resultante $c_{p,net}$ Key plan 		
Inclinação da cobertura α	Obstrução φ	Coeficientes de força global c_f	Zona A	Zona B	Zona C
0°	Máximo, qualquer φ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Máximo, qualquer φ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Máximo, qualquer φ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,6	- 2,7
15°	Máximo, qualquer φ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Máximo, qualquer φ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Máximo, qualquer φ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Máximo, qualquer φ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7
NOTA: O sinal + indica uma acção resultante do vento com sentido descendente. O sinal - indica uma acção resultante do vento com sentido ascendente.					

Anexo B

Quadro 3 – Valor de cálculo da resistência individual de peças de ligação solicitadas ao corte e/ou tração.

Modo de rotura	Parafusos	Rebites
Resistência ao corte por plano de corte	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <p>– quando o plano de corte atravessa a parte roscada do parafuso (A é a área da secção resistente do parafuso A_s):</p> <p>– para as classes 4.6, 5.6 e 8.8: $\alpha_v = 0,6$</p> <p>– para as classes 4.8, 5.8, 6.8 e 10.9: $\alpha_v = 0,5$</p> <p>– quando o plano de corte atravessa a parte não roscada do parafuso (A é a área da secção transversal bruta do parafuso): $\alpha_v = 0,6$</p>	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Resistência ao esmagamento ^{1), 2), 3)}	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$ <p>em que α_b é o menor dos valores α_d, $\frac{f_{ub}}{f_u}$ e 1,0;</p> <p>na direcção de transmissão dos esforços:</p> <p>– para parafusos de extremidade: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$</p> <p>– para parafusos interiores: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$</p> <p>perpendicularmente à direcção de transmissão dos esforços:</p> <p>– para parafusos de extremidade: k_1 é o menor dos valores $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$; $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ e 2,5</p> <p>– para parafusos interiores: k_1 é o menor dos valores $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ e 2,5</p>	$F_{b,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Resistência à tracção ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>em que $k_2 = 0,63$ para parafusos com cabeça de embeber, nos outros casos $k_2 = 0,9$</p>	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Resistência ao punçoamento	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$	Não é necessária verificação
Combinação de corte com tracção	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	

Quadro 4 – valores nominais de tensão de cedência e de rotura.

Classe do parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Quadro 5 – Geometria de parafusos.

EN ISO 4014 - Geometria dos parafusos							
Símbolo	d (mm)	d ₀ (mm)	e (mm)	s (mm)	As (mm ²)	K (mm)	A (mm ²)
Denominação	Diâmetro nominal	Diâmetro do furo	Maior dimensão da cabeça (diagonal)	Menor dimensão da cabeça (faces planas)	Área útil (rosca)	Altura da cabeça	Área total (liso)
M8	8	9	14.38	13	36.6	5.30	50.27
M10	10	11	17.77	16	58	6.40	78.54
M12	12	13	20.03	18	84.3	7.50	113.10
M14	14	15	23.36	21	115	8.80	153.94
M16	16	18	26.75	24	157	10.00	201.06
M18	18	20	30.14	27	192	11.50	254.47
M20	20	22	33.53	30	245	12.50	314.16
M22	22	24	37.72	34	303	14.00	380.13
M24	24	26	39.98	36	353	15.00	452.39
M27	27	30	45.20	41	459	17.00	572.56
M30	30	33	50.85	46	561	18.70	706.86
M33	33	36	55.37	50	694	21.00	855.30
M36	36	39	60.79	55	817	22.50	1017.88
M39	39	42	66.44	60	976	25.00	1194.59
M42	42	45	71.30	65	1120	26.00	1385.44
M45	45	48	76.95	70	1288	28.00	1590.43
M48	48	51	82.60	75	1473	30.00	1809.56
M52	52	55	88.25	80	1719	33.00	2123.72
M56	56	59	93.56	85	2030	35.00	2463.01
M60	60	63	99.21	90	2289	38.00	2827.43
M64	64	67	104.86	95	2675	40.00	3216.99

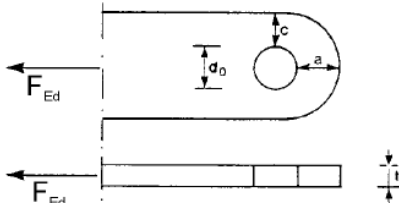
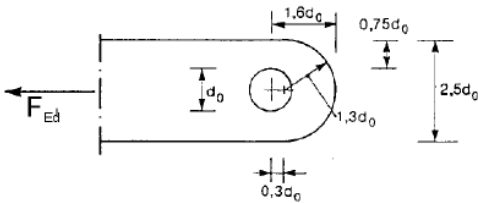
Quadro 6 – distância mínima e máxima entre eixos, distâncias às extremidades e aos bordos.

Distâncias e entreeixos, ver a Figura 3.1	Mínimo	Máximo ^{1) 2) 3)}		
		Estruturas feitas de aços respeitando a EN 10025 com excepção dos aços respeitando a EN 10025-5		Estruturas feitas de aços conformes à EN 10025-5
		Aço exposto à atmosfera ou a outras influências corrosivas	Aço não exposto à atmosfera ou a outras influências corrosivas	Aço utilizado sem protecção
Distância à extremidade e_1	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		O maior dos valores $8t$ ou 125 mm
Distância ao bordo lateral e_2	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		O maior dos valores $8t$ ou 125 mm
Distância e_3 para furos ovalizados	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Distância e_4 para furos ovalizados	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Distância entre eixos p_1	$2,2d_0$	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t_{\min}$ ou 175 mm
Distância entre eixos $p_{1,0}$		O menor dos valores $14t$ ou 200 mm		
Distância entre eixos $p_{1,i}$		O menor dos valores $28t$ ou 400 mm		
Distância entre eixos p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t_{\min}$ ou 175 mm

Quadro 6 – critérios de dimensionamento para ligações por cavilhas.

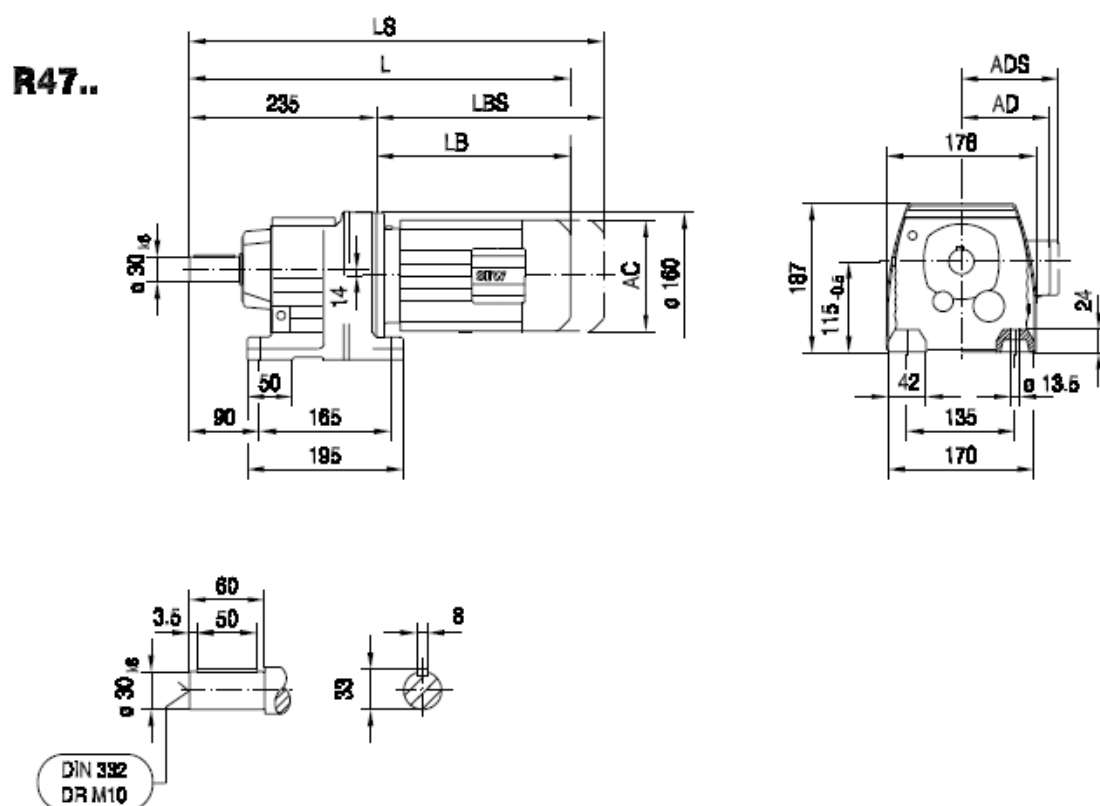
Modo de rotura	Requisitos de dimensionamento
Resistência ao corte da cavilha	$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} / \gamma_{M2} \geq F_{v,Ed}$
Resistência ao esmagamento da chapa e da cavilha No caso da cavilha ser amovível, este requisito deverá ser igualmente satisfeito.	$F_{b,Rd} = 1,5 t d f_y / \gamma_{M0} \geq F_{b,Ed}$ $F_{b,Rd,ser} = 0,6 t d f_y / \gamma_{M6,ser} \geq F_{b,Ed,ser}$
Resistência à flexão da cavilha No caso da cavilha ser amovível, este requisito deverá ser igualmente satisfeito.	$M_{Rd} = 1,5 W_{el} f_{yp} / \gamma_{M0} \geq M_{Ed}$ $M_{Rd,ser} = 0,8 W_{el} f_{yp} / \gamma_{M6,ser} \geq M_{Ed,ser}$
Resistência da cavilha a uma combinação de esforço de corte com flexão	$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1$
d diâmetro da cavilha; f_y menor dos valores das tensões de cedência da cavilha e da peça ligada; f_{up} tensão de rotura à tracção da cavilha; f_{yp} tensão de cedência da cavilha; t espessura da peça ligada; A área da secção transversal da cavilha.	

Quadro 7 – requisitos geométricos para elementos com extremidades ligadas por cavilhas.

<p>Tipo A: Espessura dada t</p>  $a \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2 t f_y} + \frac{2 d_0}{3} \quad ; \quad c \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2 t f_y} + \frac{d_0}{3}$	
<p>Tipo B: Geometria dada</p>  $t \geq 0,7 \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{f_y}} \quad ; \quad d_0 \leq 2,5 t$	

Anexo C

Informações sobre as dimensões do motor e redutor.



(→ 11)	DR63..	DT71D	DT80..	DT90..	DV100M	DV100L	DV112M	DV132S			
AC	132	145	145	197	197	197	221	221			
AD	105	122	122	154	166	166	179	179			
ADS	105	127	127	161	166	166	182	182			
L	420	434	484	504	554	584	589	637			
LS	475	498	548	589	639	669	669	717			
LB	185	199	249	269	319	349	354	402			
LBS	240	263	313	354	404	434	434	482			

Anexo D

Os desenhos técnicos encontram-se em folhas A4 e A3, estando disponíveis em formato digital.

Anexo E

Ficha de registo de manutenção.

Cliente:		Data:				
Seguidor COD:		Cliente:				
Data:		OK	NC	NA	R	O
Verificações estruturais	Verificar Apertos					
	Verificação das fixações entre base coluna e fundação					
	Verificação das fixações das rodas					
	Verificação das fixações das ligações					
	Verificação das fixações painéis					
	Verificação Visual					
	Estado de conservação da estrutura - corrosão					
	Estado de conservação da estrutura - desgaste de elementos (ex. casquilhos)					
	Estado de conservação dos painéis - limpeza, degradação					
	Lubrificação					
	Verificar e lubrificar copos de massa dos elementos móveis - coroa					
Verificações de funcionamento	Verificar Movimentos e Fins de Curso					
	Movimento rotativo - Avanço					
	Movimento rotativo - Recuo					
	Movimento basculante - Ascendente					
	Movimento basculante - Descendente					
	Fim de curso - Movimento rotativo					
	Fim de curso - Movimento basculante					
	Verificação Funcionamento Betoneiras					
	Posição Limpeza/lavagem módulos					
	Calibração do sistema					
	Paragem de emergência					
	Outras Verificações					
	Sinalética corretamente afixada					
Verificações de programação	Verificar e Reajustar se Necessário					
	Hora solar					
	Data					
	Limites software					
	Calibração com sol					
	Anemómetro - leitura					
	Anemómetro - funcionamento					
	Coordenadas					

Verificações elétricas	Verificar Cablagem						
	Verificar a disposição dos cabos						
	Movimentação livre dos cabos						
	Sem danos nos cabos						
OK-Conforme; NC-Não Conforme; NA-Não Aplicável; R-Rectificado; O-Observações							
Observações:							